

砒砂岩区主要造林树种枯落物持水性能及土壤物理性质

吴晓光^{1,2,3}, 刘龙¹, 张宏飞², 孙林⁴, 闫旭东², 董晓宇¹, 姚云峰¹

(1.内蒙古农业大学沙漠治理学院,呼和浩特 010011; 2.内蒙古自治区土地整治中心,呼和浩特 010020;
3.内蒙古自治区土地调查规划院,呼和浩特 010010; 4.内蒙古自治区农牧业科学院,呼和浩特 010030)

摘要:为揭示砒砂岩区主要造林树种枯落物持水性能及林下土壤物理性质变化特征,以位于黄土高原北部准格尔旗砒砂岩区6种林分类型为研究对象,运用浸泡法和烘干法,对林下枯落物、土壤(0—50 cm)的持水性能及物理性质进行研究。结果表明:(1)砒砂岩区6种林分类型林下枯落物厚度范围为0.73~2.77 cm,总蓄积量范围为1.47~7.93 t/hm²。枯落物层厚度、总蓄积量大小依次为油松、侧柏、沙棘、柠条锦鸡儿、山杏和撂荒地。枯落物未分解层厚度及其蓄积量均明显大于半分解层。(2)林下枯落物最大持水率范围为149.48%~267.32%,枯落物最大持水率与有效拦蓄量大小顺序一致,为撂荒地<柠条锦鸡儿<沙棘<山杏<侧柏<油松;枯落物最大持水量和有效拦蓄量均呈现出未分解层高于半分解层。(3)林下枯落物层在浸泡0.5 h吸水速率最快,浸泡1 h持水量增加迅速,浸泡8 h吸水速率和持水量增量趋近于0。(4)林下土壤容重低于撂荒地;总孔隙度范围为44.36%~32.57%,最大持水量范围为8.89~17.43 mm,均呈现油松林下最大,山杏林下最小。(5)林下枯落物蓄积量与土壤容重呈负相关关系,与土壤孔隙度、毛管孔隙度和非毛管孔隙度分别呈正相关关系。油松林、侧柏林地具有显著的保持水土能力。研究成果为开展砒砂岩区水土流失综合整治和生态修复提供了参考依据。

关键词:砒砂岩区;林分类型;枯落物;持水性能;土壤物理性质

中图分类号:S714.7

文献标识码:A

文章编号:1009-2242(2020)04-0137-08

DOI:10.13870/j.cnki.stbcbx.2020.04.021

Litter Water-holding Capacity and Soil Physical Properties of Main Afforestation Tree Species in Sandstone Area

WU Xiaoguang^{1,2,3}, LIU Long¹, ZHANG Hongfei², SUN Lin⁴,

YAN Xudong², DONG Xiaoyu¹, YAO Yunfeng¹

(1.College of Desert Control Science and Engineering, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010011; 2.The Center of Inner Mongolia Autonomous Region Land Consolidation and Rehabilitation, Hohhot 010020; 3.Inner Mongolia Land Surveying and Planning Institute, Hohhot 010010; 4.Inner Mongolia Academy of Agricultural Sciences & Animal Husbandry, Hohhot 010030)

Abstract: In order to reveal the relationship between the litter water-holding capacity of the main afforestation species and the soil physical properties under the forest in sandstone area, the water holding capacity of the litter layer under 6 forest types and the physical properties of the soil layer and the water holding capacity of the 0—50 cm soil layer in Jungar Banner sandstone area were investigated. The results showed: (1) The thickness of litter layer under 6 forest types in the sandstone area varied from 0.73 to 2.77 cm and the total volume varied from 1.47 to 7.93 t/hm². The total litter volume of different tree species was consistent with thickness in the order of *Pinus tabulaeformis* > *Platycladus orientalis* > *Hippophae rhamnoides* > *Caragana korshinskii* > *Prunus sibirica* > Abandoned land. It was found that the thickness of semi-decomposed layer of litter and its accumulation were significantly less than those of undecomposed layers by comparing the two layers of 6 types of forest stand litter. (2) The order of the maximum water holding ratio was Abandoned land < *C. korshinskii* < *H. rhamnoides* < *P. sibirica* < *P. orientalis* < *P. tabulaeformis*, among which the maximum water holding capacity of litter under *P. tabulaeformis* reached 267.32%, and the maximum water holding capacity in abandoned land was the smallest, and the minimum was about 149.48%. The maximum water holding capacity of the 6 forest stands was in the same order as the effective litter storage quantity,

收稿日期:2019-11-30

资助项目:内蒙古自治区科技计划项目(2019GG010);内蒙古自治区自然资源厅综合类项目

第一作者:吴晓光(1987—),男,内蒙古赤峰人,博士,高工,主要从事水土保持与荒漠化防治研究。E-mail:wxcg2013@163.com

通信作者:姚云峰(1959—),男,内蒙古阿拉善左旗人,教授,博士生导师,主要从事水土保持与荒漠化防治研究。E-mail:18904718855@163.com

which was *P. tabulaeformis* > *P. orientalis* > *P. sibirica* > *H. rhamnoides* > *C. korshinskii* > Abandoned land. The effective interception volume of the undecomposed litter was greater than the semi-decomposition layer. (3) It was found that the water holding capacity, water absorption rate, and soaking time of the undecomposed layer and semi-decomposition layer displayed the logarithmic relationship of $Q = k \ln t + b$ and the $V = kt^n$. (4) The soil bulk density of the 6 forest types showed little change. The total porosity changed in the order of *P. tabulaeformis* forest > *H. rhamnoides* forest > *P. orientalis* > *C. korshinskii* > Abandoned land > *P. sibirica*. The non-mathematical porosity was in the order of *H. rhamnoides* > *P. orientalis* > *P. tabulaeformis* > *P. sibirica* > abandoned land > *C. korshinskii*. The maximum water holding capacity was 17.43 mm in *P. tabulaeformis* forest. The minimum water holding capacity was 8.89 mm in *P. sibirica* forest. The order of the water holding capacity of the non-capillary followed the order of non-mathematical porosity of 6 forest stands.

Keywords: sandstone area; stand type; litter; water-holding ability; physical characteristics of soil

林下枯落物层作为森林生态系统中独有的层次,主要由植物枝、叶、皮等凋落物沉积组成,与森林树冠层、冠层及根系同属林地垂直结构的关键组成部分^[1]。在森林生态系统中林下枯落物具有水源涵养、水分循环、区域水土保持等重要作用,同时对林下根系土壤功能效应的发挥起到关键作用。林下枯落物的沉积分解是森林生态系统养分循环至关重要的过程^[1-2]。林下枯落物层具有孔隙多、蓬松、透水性强、持水能力好等特点^[3],尤其是在降雨过程中,具有减少雨水冲蚀、吸附地表水、减缓地表径流、增加土壤入渗时间和入渗量,减少土壤养分的流失作用^[4]。张峰等^[5]研究表明,林下枯落物层对培育土壤、抑制土壤水分蒸发、降低地表径流、防止土壤冲蚀和溅蚀等方面具有积极作用。

砒砂岩区主要分布在黄土高原北部晋陕蒙接壤的鄂尔多斯高原。鄂尔多斯市准格尔旗圪塔沟流域地处黄土丘陵沟壑区第一副区,属于典型的砒砂岩区。区内植被稀疏、地表裸露、丘陵起伏、沟壑纵横、土壤贫瘠、暴雨集中、水土流失严重。该区域是著有“世界水土流失之最”之称的裸露砒砂岩区^[6-7]。刘龙^[1]、童伟等^[8]、肖培青等^[7]研究发现,砒砂岩具有因缺水而坚硬如石、因风蚀而风化、因水合而松软如泥、因遭雨淋、低温和暴晒而松散成砂等特有性质。研究区域降雨量少且雨热同季,土壤含水量低,极易发生地表径流,风蚀水蚀严重,生态环境脆弱,是黄河的输泥沙源^[9]。因此,部分树木难以扎根,生长不良,时有枯枝落叶,树木的成活率低,甚至会出现植被大范围干枯死亡,天然植被难以恢复,影响林分的健康可持续发展^[10]。杨振奇等^[11]研究表明,1990年以来,研究区大面积人工造林和实施水土流失治理措施,区域生态环境不同程度地得到了改善,但造林树种繁多。砒砂岩主要造林树种的水源涵养功能和水土保持功能有待深入研究。樊登星等^[12]、陈倩等^[13]、张海涛等^[14]对不同区域、不同类型林下枯落物的凋落量、持水性、水分循环、土壤物理性

质方面进行了研究,且取得了一系列的创新成果;陈百灵等^[15]研究了大兴安岭地区落叶松针叶林枯落物对水质抚育强度和水土保持能力;赵鸿雁等^[16]对陕北黄龙山区人造油松林的水文生态效应进行了研究,阐明了人造油松林的涵养水源效应;李超等^[17]对大兴安岭林窗改造及带状改造枯落物的水文效应进行了研究,表明,不同地区、不同林型下地表凋落物的组成与结构性质差异很大,因此其保持水土能力和水源涵养功能差异较大。鄂尔多斯高原的砒砂岩区林下枯落物层持水特性、枯落物蓄积量以及林下土壤涵养水源特性的研究亟待开展。

本研究以砒砂岩区6种林分类型沙棘(*Hippophae rhamnoides*)、柠条锦鸡儿(*Caragana korshinskii* Kom.)、油松(*Pinus tabulaeformis*)、山杏(*Prunus sibirica*)、侧柏(*Platycladus orientalis*)纯林和撂荒地作为研究对象,对其林下枯落物层的持水特性及土壤物理性质进行定量测定,旨在明晰砒砂岩区6种主要造林树种下枯落物层的持水特性规律及土壤物理性质变化特征,以期对砒砂岩区生态修复、植被重建和区域水土流失治理提供参考依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区地理坐标 39°42′—39°50′N, 110°25′—110°48′E, 平均海拔为 800~1 590 m, 位于内蒙古鄂尔多斯市准格尔旗暖水乡北方圪塔沟流域内。试验区占地面积约为 96 km², 平均日照时间 2 900~3 100 h, 无霜期 148 d。降雨少而集中, 年均降水量约 400 mm, 年均蒸发量 2 093 mm, 年平均气温为 6.2~8.7 °C, ≥10 °C 积温为 2 900~3 500 °C, 年总辐射值为 143.4 kCal/m²。年平均风速 3.2 m/s, 冬春季风力大, 平均风速 3.6 m/s, 最大风速达到 32 m/s, 大风日数 10~30 天, 属于典型的中温带半干旱大陆性季风气候区。研究区域内沟壑纵横, 梁峁起伏不平, 土壤受风和水侵蚀严

重。土壤类型主要以黄绵土为主,并伴随着以栗钙土和风沙土为主的砒砂岩景观,该流域进行了人工造林、防风固沙和保持水土措施,人工造林乔木以青杨(*Populus cathayana*)、旱柳(*Salix matsudana*)、侧柏(*Platyclusus orientalis*)和油松(*Pinus tabuliformis*)等为主;灌木以沙棘(*Hippophae rhamnoides*)、柠条锦鸡儿(*Caragana korshinskii* Kom.)和山杏(*Prunus sibirica*)等为主;草本植物以阿尔泰狗娃花(*Heteropappus altaicus*)、猪毛菜(*Salsola nitraria*)、紫花苜蓿(*Medicago sativa* L.)和羊草(*Leymus chinensis*)等为主。

1.2 材料与方法

1.2.1 采样与调查

2017年8月根据试验设计的地形地貌特征、人工林地的种植情况以及土地利用状况

等特性,选定圪秋沟流域人工林地作为本试验的研究区,同时进行了实地详细调查。依据立地条件(种植密度、高度、覆盖度等)一致、外界基本无扰动的基本原则,选定5年林龄、长势良好的5个人工林样地,标准样地为30 m×30 m,采用临近撂荒地作为对照样地。在5个样地内的四角及中心位置选择5个标准样方(1 m×1 m)。在保持枯落物原状的情况下,样方内的枯落物按未分解层、半分解层分别进行记录厚度和采集样品,样品直接装入密封袋中,并做好标记,用于测定样方持水性能。在5个样地分别挖掘土壤剖面,用容积100 cm³的环刀,按照土层0—10,10—30,30—50 cm 分层取样,每层3个重复,样品称重并带回实验室,用于测定林下土壤物理性质和土壤持水能力。样地基本概况见表1。

表 1 样地基本概况

林分类型	林龄/ a	海拔/ m	土壤类型	土层厚度/cm	坡度/ (°)	坡向	平均高度/m	平均地径/cm	郁闭度/ %
沙棘	5	1255.7	黄绵土	35	20	西北	2.27	1.76	95
柠条锦鸡儿	5	1265.6	黄绵土	40	20	西北	1.83	1.42	83
油松	5	1195.8	风沙土	25	15	西北	2.78	7.67	61
山杏	5	1240.1	风沙土	>100	15	西北	2.57	6.56	72
侧柏	5	1232.2	黄绵土	45	10	西北	2.46	6.15	58
撂荒地	—	1167.8	栗钙土	>100	15	西北	0.176	—	47

1.2.2 测定方法

采用烘干法对枯落物蓄积量进行测定,具体操作方法为:按照试验设计的取样层次将收集到的枯落物进行称量,以其自然状态质量为标准,推算枯落物自然状态储量,然后将其在80℃下烘至恒重,进行称量,计算干物质量和枯落物蓄积量。林下枯落物的持水量及其吸水速率采用浸泡法测定,操作方法为:将枯落物浸入水中,依次在0.25,0.50,1.00,2.00,4.00,8.00,10.00,24.00 h时测定枯落物重量,计算枯落物各浸水时间的持水量和枯落物的吸水速率,研究枯落物的吸水速率变化动态。其计算表达式为:

$$\text{枯落物最大持水量: } W_{\max} = MR_{\max}$$

式中: W_{\max} 为枯落物最大持水量(t/hm²); M 为枯落物累积量(t/hm²); R_{\max} 为枯落物最大持水率(%)。

$$\text{枯落物持水量: } W_t = W_{tLw} - W_{LD}$$

式中: W_t 为 t 时刻枯落物持水量(g); W_{tLw} 为 t 时刻枯落物的湿重(g); W_{LD} 为枯落物干重(g)。

$$\text{枯落物最大持水率: } R_{\max} = (W_1 - W_2) / W_2 \times 100\%$$

式中: R_{\max} 为枯落物最大持水率(%) ; W_1 为浸水24 h后枯落物重量(g); W_2 为枯落物干重(g)。

$$\text{枯落物吸水速率: } V = W_t / t$$

式中: V 为枯落物浸水 t 时刻的吸水速率(mm/h); W_t 为 t 时刻枯落物持水量(mm); t 为枯落物浸泡时间(h)。

$$\text{枯落物有效拦蓄量: } W_{sv} = (0.85R_{\max} - R_0) \times M$$

式中: W_{sv} 为枯落物有效拦蓄量(t/hm²); R_{\max} 为枯落

物最大持水率(%) ; R_0 为自然含水率(%) ; M 为枯落物累积量(t/hm²)。

土壤物理性质指标测定:采集的土样带回实验室,在水中充分浸泡12 h立即称重,用于计算土壤最大持水量(%);将其放置预先备好的沙盘中2 h后称重,用于计算土壤毛管持水量(%);将环刀继续放置沙盘24 h后称重,用于计算土壤最小持水量(%);将称重后的环刀再放入烘干箱内烘干,称重记录环刀质量和干土质量,计算土壤容重、土壤孔隙度等指标。各项指标的计算公式为:

$$\text{土壤容重: } P = (M - M_0) / V$$

式中: P 为土壤容重(g/cm³); M 为环刀干土重(g); M_0 为环刀重(g); V 为环刀容积(cm³)。

$$\text{毛管持水量: } C_m = (M_{Z2} - M) / (M - M_0) \times 100\%$$

式中: C_m 为毛管持水量(%); M_{Z2} 为置沙2 h环刀土重(g); M 为环刀干土重(g); M_0 为环刀重(g)。

$$\text{土壤最大持水量: } C_{\max} = (M_{J12} - M) / (M - M_0) \times 100\%$$

式中: C_{\max} 为土壤最大持水量(%); M_{J12} 为浸水12 h环刀土重(g); M 为环刀干土重(g); M_0 为环刀重(g)。

$$\text{土壤最小持水量: } C_{\min} = (M_{Z24} - M) / (M - M_0) \times 100\%$$

式中: C_{\min} 为土壤最小持水量(%); M_{Z24} 为置沙24 h环刀土重(g); M 为环刀干土重(g); M_0 为环刀重(g)。

$$\text{非毛管孔隙度: } G_{fm} = (C_{\max} - C_m) \times P$$

式中: G_{fm} 为非毛管孔隙度(%); C_{\max} 为土壤最大持水量

(%); C_m 为毛管持水量(%); P 为土壤容重(g/cm^3)。

毛管孔隙度: $G_m = C_m \times P$

式中: G_m 为毛管孔隙度(%); C_m 为毛管持水量(%);

P 为土壤容重(g/cm^3)。

总孔隙度: $G_z = G_{fm} + G_m$

式中: G_z 为总孔隙度(%); G_{fm} 为非毛管孔隙度(%);

G_m 为毛管孔隙度(%)。

1.3 数据分析

采用 Excel 分析和 SPSS 软件分析对试验数据进行处理制图。

2 结果与分析

2.1 不同林分类型林下枯落物层厚度与蓄积量研究

由表 2 可知, 6 种林分类型枯落物总厚度范围为

0.73~2.77 cm, 油松林下枯落物总厚度最厚为 2.77 cm, 撂荒地(对照)最薄为 0.73 cm, 枯落物总厚度由厚到薄依次为油松、侧柏、沙棘、柠条锦鸡儿、山杏、撂荒地。6 种林分类型林下枯落物单位面积总蓄积量与枯落物厚度排序相同, 油松林的总蓄积量最大为 $7.93 t/hm^2$, 与撂荒地($1.47 t/hm^2$)相差 $6.46 t/hm^2$, 与山杏地($3.68 t/hm^2$)相差 $4.25 t/hm^2$ 。进一步分析表明, 6 种林分类型林下枯落物蓄积量与厚度呈正相关关系, 未分解层和半分解层的蓄积量与厚度也呈正相关关系。枯落物的未分解层蓄积量和厚度显著大于半分解层。基于此, 对枯落物蓄积量与厚度建立回归关系, 结果表明, 二者之间呈线性关系, 关系式为 $y = 3.79x - 0.782, R^2 = 0.895 (P < 0.05)$ 。

表 2 6 种不同林分类型林下枯落物厚度与蓄积量

林分类型	总厚度/ cm	枯落物厚度/cm		总蓄积量/ ($t \cdot hm^{-2}$)	枯落物蓄积量/($t \cdot hm^{-2}$)			
		未分解层	半分解层		未分解层		半分解层	
					蓄积量/ ($t \cdot hm^{-2}$)	百分比/ %	蓄积量/ ($t \cdot hm^{-2}$)	百分比/ %
沙棘	1.77	0.99	0.78	6.42	3.46	53.89	2.96	46.11
柠条锦鸡儿	1.61	0.89	0.72	4.96	2.85	57.46	2.11	42.54
油松	2.77	1.64	1.13	7.93	4.97	62.67	2.96	37.33
山杏	1.45	0.79	0.66	3.68	1.95	52.99	1.73	47.11
侧柏	2.34	1.23	1.11	7.67	4.12	53.72	3.55	46.28
撂荒地	0.73	0.39	0.34	1.47	0.79	53.74	0.68	46.26

2.2 不同林分类型林下枯落物的持水能力研究

由表 3 可知, 撂荒地的持水能力低于其他 5 种树种林下枯落物持水能力, 不同林分类型林下枯落物的持水率由小到大依次为撂荒地、柠条锦鸡儿、沙棘、山杏、侧柏、油松。油松林下枯落物持水率最大为 267.32%, 吸水量相当于自身重量的 2.57 倍。撂荒地枯落物持水率最小, 其最大持水率为 149.48%, 吸水量相当于自身重量的 1.36 倍。枯落物最大持水量

是一种极度饱和的状态, 而枯落物对降水实际截留能力低于最大持水量, 因此, 不可用枯落物最大持水量代表拦蓄量。通过对 6 种林分类型枯落物层对一次降水实际有效拦蓄能力分析可知, 6 种林分类型枯落物有效拦蓄量能力与最大持水率一致。对枯落物未分解层和半分解层持水能力进行分析可知, 6 种林分类型最大持水量和有效拦蓄量均呈现出未分解层明显高于半分解层。

表 3 6 种不同林分类型林下枯落物持水能力

林分类型	总最大持水率/%	最大持水量/($t \cdot hm^{-2}$)		总最大持水量/ ($t \cdot hm^{-2}$)	有效拦蓄量/($t \cdot hm^{-2}$)		总有效拦蓄量/ ($t \cdot hm^{-2}$)
		未分解层	半分解层		未分解层	半分解层	
沙棘	178.23	4.59	3.26	7.85e	3.62	2.48	6.10
柠条锦鸡儿	163.47	3.76	2.62	6.38e	2.95	2.17	5.12
油松	267.32	11.23	7.37	18.60b	8.23	5.43	13.66
山杏	202.37	7.14	4.89	12.03c	5.54	3.72	9.26
侧柏	212.45	7.42	5.43	12.85a	5.74	3.96	9.70
撂荒地	149.48	1.34	1.02	2.36d	1.03	0.84	1.87

注: 同列不同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$)。

2.3 不同林分类型林下枯落物的持水动态研究

2.3.1 枯落物不同层次持水量的动态过程分析 由图 1 和图 2 可知, 不同林分类型林下枯落物在浸泡的第 1 h 内, 枯落物的持水量增加迅速。随着浸水时间的增加, 枯落物的持水量增加缓慢。这一现象说明在自然降雨的过程中, 严重失水的枯落物在严重失水的

状态(干燥)下能够迅速吸水, 但随着枯落物吸水达到一定程度, 其吸持水能力出现降低态势^[18]。浸泡时间在 8 h 左右时, 枯落物的持水量接近最大值, 之后随着浸泡时间的增加其持水量基本不变。

同一树种枯落物持水量随着浸水时间延长而增加, 同一树种不同枯落物层持水量呈现未分解层高于

半分解层,相同浸水时长不同枯落物层最大持水量均呈现油松>侧柏>山杏>沙棘>柠条锦鸡儿>撂荒地规律。枯落物未分解层油松林最大持水量 1.00 5 mm,是撂荒地的 4.39 倍,5 种林分持水能力最弱的是柠条锦鸡儿,其最大持水量为 0.388 mm,是撂荒地的 1.69 倍;油松林枯落物半分解层的最大持水量为 0.747 mm,是撂荒地的 7.62 倍,而柠条锦鸡儿半分解层的最大持水量是撂荒地的 2.31 倍。充分说明林下枯落物的持水能力强于撂荒地(对照)枯落物。

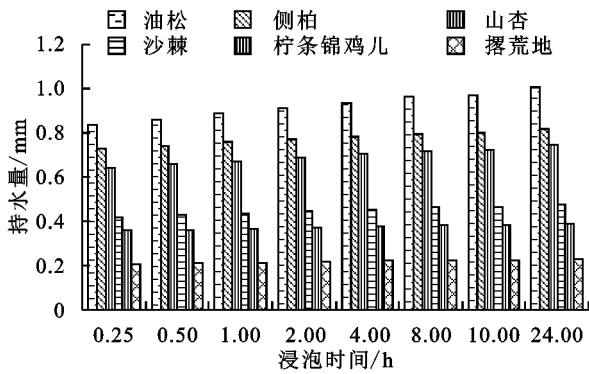


图 1 不同林分类型林下枯落物未分解层持水量与浸泡时间关系

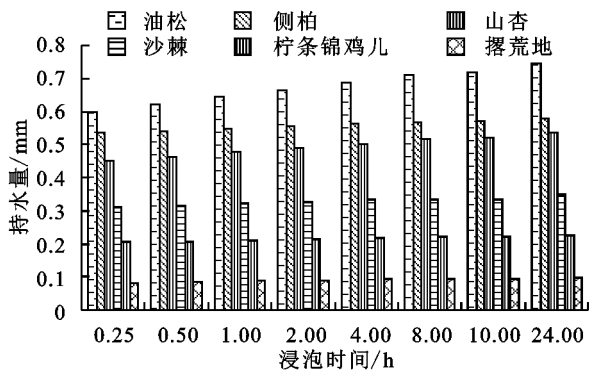


图 2 不同林分类型林下枯落物半分解层持水量与浸泡时间关系

为进一步明晰不同枯落物层持水量与浸泡时间的关系,经回归方程拟合二者呈对数关系,相关系数 R^2 均在 0.85 以上,拟合效果较好,拟合关系式见表 4。拟合基本关系式为: $Q = k \ln t + b$ 。式中: Q 为浸泡 t 时间枯落物持水量(mm); t 为枯落物浸水时间(h); k 为方程系数; b 为方程常数项。

2.3.2 枯落物不同层吸水速率的动态过程分析 由图 3 和图 4 可知,6 种林分类型林下不同枯落物层的吸水速率变化随着浸泡时间的延长而降低,同一浸泡时间同一树种的不同枯落物层吸水速率变化呈现未分解层高于半分解层。本研究还发现,在浸泡 0.5 h,枯落物不同层次吸水速率出现第 1 个拐点,这主要是由于枯落物从烘干的状态浸入水中后,枯落物表面及细胞间的水势差较大,从而枯落物的吸水速率最高。随着浸泡时间的延长,枯落物吸水速率急剧下降,浸泡 4.0 h 左右吸水速

率变化明显减缓,浸泡 8.0 h 吸水速率趋近于 0,处于渐饱和状态,浸泡 24 h 吸水过程基本停止。分析其原因主要是随着浸泡时间的增加,枯落物吸水逐渐达到饱和状态,吸水速率随着持水量增加逐渐减小^[19]。

表 4 6 种不同林分类型林下枯落物与浸泡时间关系

林分类型	枯落物层	拟合关系式	R^2
沙棘	未分解层	$Q = 0.0128 \ln t + 0.4367$	0.9578
	半分解层	$Q = 0.0082 \ln t + 0.3217$	0.9174
柠条锦鸡儿	未分解层	$Q = 0.0069 \ln t + 0.3657$	0.8742
	半分解层	$Q = 0.0048 \ln t + 0.2107$	0.8958
油松	未分解层	$Q = 0.0374 \ln t + 0.8857$	0.8978
	半分解层	$Q = 0.0326 \ln t + 0.6432$	0.8768
山杏	未分解层	$Q = 0.0224 \ln t + 0.6732$	0.9341
	半分解层	$Q = 0.0192 \ln t + 0.4762$	0.9521
侧柏	未分解层	$Q = 0.0189 \ln t + 0.7567$	0.9437
	半分解层	$Q = 0.0097 \ln t + 0.5478$	0.8849
撂荒地	未分解层	$Q = 0.0047 \ln t + 0.2142$	0.8673
	半分解层	$Q = 0.0032 \ln t + 0.0876$	0.8753

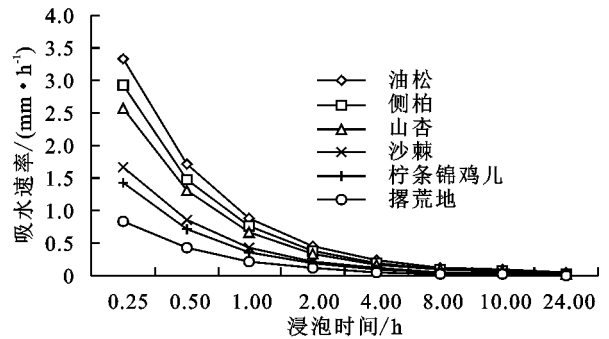


图 3 不同林分类型林下枯落物未分解层吸水速率与其浸泡时间关系

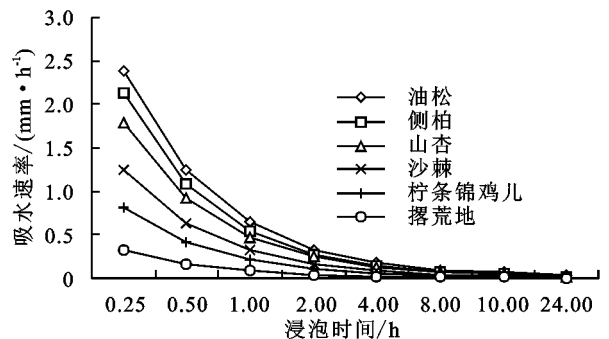


图 4 不同林分类型林下枯落物半分解层吸水速率与其浸泡时间关系

研究 6 种林分类型下不同枯落物层吸水速率与浸泡时间的相关关系发现,二者呈幂函数关系,相关系数 $R^2 \geq 0.9$,拟合效果较好,拟合关系式见表 5。拟合基本关系式为: $V = kt^n$ 。式中: V 为枯落物吸水速率(mm/h); t 为枯落物浸泡时间(h); k 为方程回归系数; n 为方程的指数。

2.4 不同林分类型林下土壤层物理性质及持水能力研究

由图 5 可知,样地林下土壤容重差异明显,林下

土壤容重低于撂荒地,表明林下土壤质地较撂荒地好。油松林土壤容重最小,为 1.482 g/cm^3 ,比撂荒地 (1.703 g/cm^3) 低 12.98% ,沙棘林 (1.499 g/cm^3) 比撂荒地低 11.98% ,侧柏林 (1.563 g/cm^3) 和柠条锦鸡儿林地 (1.592 g/cm^3) 分别比撂荒地低 8.22% 和 6.52% ,而山杏林地 (1.734 g/cm^3) 比撂荒地高 1.82% 。

表 5 6 种不同林分类型林下枯落物吸水速率与浸泡时间拟合关系

林分类型	枯落物层	拟合关系式	R^2
沙棘	未分解层	$V=2.8376t^{-2.105}$	0.9352
	半分解层	$V=2.1086t^{-2.115}$	0.9354
柠条锦鸡儿	未分解层	$V=2.4238t^{-2.127}$	0.9353
	半分解层	$V=1.3860t^{-2.118}$	0.9353
油松	未分解层	$V=5.6154t^{-2.078}$	0.9350
	半分解层	$V=4.0128t^{-2.061}$	0.9347
山杏	未分解层	$V=4.3411t^{-2.096}$	0.9351
	半分解层	$V=3.0301t^{-2.082}$	0.9350
侧柏	未分解层	$V=4.9575t^{-2.114}$	0.9353
	半分解层	$V=3.6393t^{-2.129}$	0.9354
撂荒地	未分解层	$V=1.4115t^{-2.120}$	0.9353
	半分解层	$V=0.5615t^{-2.090}$	0.9352

由图 5 和图 6 分析可知,林下土壤总孔隙度范围为 $32.57\% \sim 44.36\%$,油松林下最高,山杏林下最小;林下土壤毛管孔隙度范围为 $25.07\% \sim 37.32\%$,油松林下最高,沙棘林下最小;林下土壤非毛管孔隙度范围 $1.66\% \sim 14.09\%$,沙棘林下最高,柠条锦鸡儿最小。林下土壤最大持水量范围为 $8.89 \sim 17.43 \text{ mm}$,油松林最高,山杏林最低。不同孔隙土壤持水量差异较大,但其持水能力与不同孔隙高低直接相关。本研究还发现,土壤总孔隙度和毛管孔隙度占比越高,土壤容重越小,其持水量越高,林下土壤保持水分能力越强。土壤非毛管孔隙度占比越高,吸水速率越快,土壤透水性、通气性好,表明涵养水源能力较强。

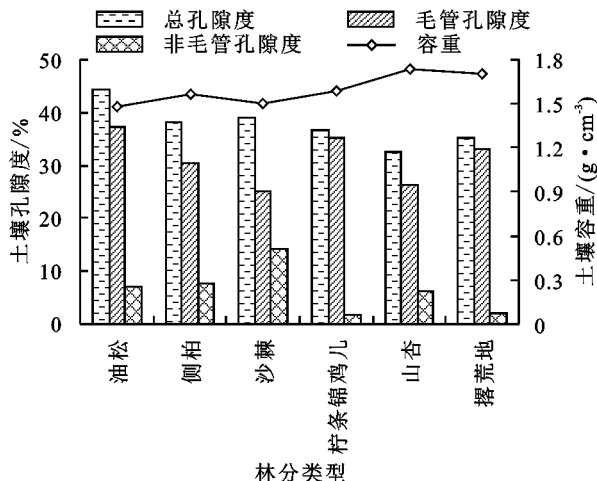


图 5 不同林分类型林下土壤孔隙度及容重

2.5 不同林分类型林下蓄积量与土壤物理性质相关性研究

通过对 6 种林分类型林下蓄积量与土壤物理性

质相关性(表 6)研究发现,枯落物蓄积量与林下 0—50 cm 土壤容重呈负相关关系,其中,油松、侧柏、撂荒地枯落物蓄积量与土壤容重呈现极显著负相关 ($P < 0.01$),表明蓄积量越大,土壤容重越小;反之,土壤容重则越大。6 种林分类型林下蓄积量与土壤孔隙度、毛管孔隙度和非毛管孔隙度分别呈正相关关系,表明随着蓄积量的增大,枯枝落叶逐渐分解对土壤质量的改善及孔隙度的增加有着极为重要的作用,而且呈显著相关关系。

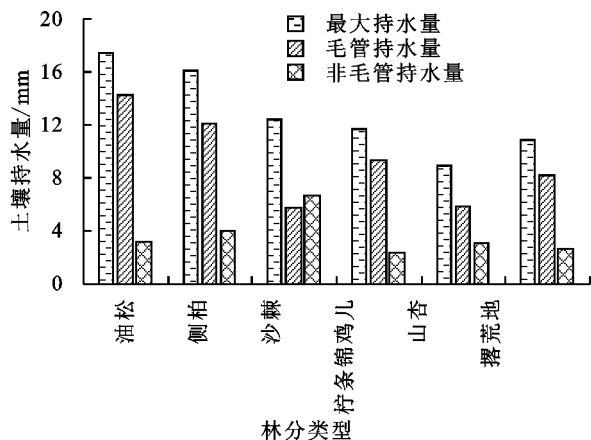


图 6 不同林分类型林下土壤持水量

表 6 6 种不同林分类型林下枯落物蓄积量与土壤物理性质的相关关系

林分类型	土壤容重	总孔隙度	毛管孔隙度	非毛管孔隙度
沙棘	-0.312	0.472	0.705**	0.463
柠条锦鸡儿	-0.562*	0.667*	0.629*	0.745**
油松	-0.834**	0.687*	0.362	0.798**
山杏	-0.676*	0.814**	0.823**	0.514*
侧柏	-0.774**	0.596*	0.749**	0.602*
撂荒地	-0.801**	0.816**	0.415	0.665*

注: * 表示显著相关 ($P < 0.05$); ** 表示极显著相关 ($P < 0.01$)。

3 讨论

森林在水循环中起着重要的调节作用。森林持水性能受森林生态系统结构层次中土壤层及枯落物层共同影响,土壤贮库的大小、土壤容重、孔隙度等因素对森林的持水能力影响显著。枯落物层可有效减少森林生态系统地面径流量,增强土壤持水能力,改善表层土壤的物理性状,防治土壤的流失。因此,枯落物层对水分循环、土壤功能的发挥起重要作用。张君玉等^[20] 研究报道,枯落物层厚度与枯落物蓄积量呈显著正相关关系;庞梦丽等^[21] 研究发现,枯落物层厚度与枯落物蓄积量直接相关,同时还受林地类型、郁闭度等因素的影响。本试验研究了 6 种林分的枯落物层与蓄积量的关系,回归分析结果表明,所有的林分类型枯落物层厚度与其蓄积量呈线性关系,大小顺序一致。枯落物半分解层厚度及蓄积量明显小于未分解层。胡晓聪等^[22]、Qi 等^[23] 研究结果与本研究

结果一致,而与惠淑荣等^[24]研究结果正好相反。这主要与林分类型、枯落物组成以及独特的砒砂岩特性的不同有关。侯瑞萍等^[25]研究表明,枯落物持水性中最为主要的指标之一就是枯落物最大持水率,枯落物特性及枯落物分解程度是影响枯落物最大持水率的主要因素,而枯落物持水率和累积量是影响枯落物持水量的主要因素。本试验对6种林分类型下枯落物层持水量的研究表明,撂荒地的树种林下枯落物持水能力均小于试验组。最大持水量及持水率由小到大依次为撂荒地、柠条锦鸡儿、沙棘、山杏、侧柏、油松。这一结果与周志立等^[26]、Zhao等^[27]、吴晓光等^[28]研究结果相符合。本研究表明,6种造林树种林下枯落物浸水时间与持水量呈显著对数函数关系,其枯落物浸水时间与吸水速率呈显著幂函数关系。这一研究结果与魏雅丽等^[29]、卢振启等^[30]、Du等^[31]研究规律相同。这主要归因于不同的枯落物其组成、特性不同,导致枯落物的持水量、吸水速率、分解程度有明显差异。本试验在充分研究不同林分类型林下土壤的持水能力与其物理性状的相关关系发现,6种造林树种林下土壤最大持水量最大的树种是油松林,主要由于油松林下土壤结构更为疏松,容纳毛管水更多,因此更有利于植被生长发育。这一现象与赵赫然等^[32]研究结果相一致。砒砂岩区推荐造林树种为油松、侧柏、沙棘和柠条锦鸡儿,主要适用于干旱、地形破碎、土壤贫瘠、水土流失严重的坡地、台地和沟坝地等区域。

4 结论

(1)砒砂岩区6种林分类型林下枯落物层薄厚范围为0.73~2.77 cm,总蓄积量范围为1.47~7.93 t/hm²,枯落物层蓄积量与其厚度呈线性显著正相关关系, $R^2=0.895$ 。枯落物层的厚度与总蓄积量大小顺序依次是油松、侧柏、沙棘、柠条锦鸡儿、山杏和撂荒地;6种林分类型林下枯落物未分解层厚度及其蓄积量均明显大于半分解层。

(2)砒砂岩区6种林分类型林下枯落物最大持水率范围为149.48%~267.32%,其最大持水率与有效拦蓄量的大小顺序一致,为撂荒地<柠条锦鸡儿<沙棘<山杏<侧柏<油松;6种林分类型最大持水量和有效拦蓄量均呈现未分解层高于半分解层。

(3)砒砂岩区6种林分类型不同林下枯落物层在浸泡0.5 h吸水速率最快,浸泡1 h持水量增加迅速,浸泡8 h吸水速率和持水量增量趋近于0,接近饱和状态。6种林分类型不同林下枯落物层持水量与浸水时间呈显著对数函数关系($Q=k\ln t+b, R^2\geq 0.85$),其吸水速率与浸水时间呈极显著幂函数关系($V=kt^n, R^2\geq 0.90$)。

(4)砒砂岩区6种林分类型林下土壤容重范围为

1.482~1.734 g/cm³,总体呈现出林下的低于撂荒地的,油松林下的最小,撂荒地与山杏林最大;总孔隙度范围为32.57%~44.36%,油松林下的最大,山杏林下的最小;林下土壤最大持水量范围为8.89~17.43 mm,油松林下的最大,山杏林下的最小。

(5)砒砂岩区6种林分类型林下枯落物蓄积量与土壤容重呈负相关关系,与土壤孔隙度、毛管孔隙度和非毛管孔隙度分别呈正相关关系。砒砂岩区油松、侧柏林地具有显著的保持水土能力。

参考文献:

- [1] 刘龙.砒砂岩区3种林地持水性能与林木耗水规律研究[D].呼和浩特:内蒙古农业大学,2019.
- [2] 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):121-125,130.
- [3] 赵雨森,韩春华,张宏光,等.阿什河上游小流域主要林分类型土壤水文功能研究[J].水土保持学报,2012,26(2):203-208.
- [4] 杨吉华,张永涛,李红云,等.不同林分枯落物的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.
- [5] 张峰,彭祚登,安永兴,等.北京西山主要造林树种林下枯落物的持水特性[J].林业科学,2010,46(10):6-14.
- [6] 党晓宏,高永,汪季.砒砂岩沟坡沙棘根系分布特征及其对林下土壤的改良作用[J].中国水土保持科学,2012,10(4):45-50.
- [7] 肖培青,姚文艺,刘慧.砒砂岩地区水土流失研究进展与治理途径[J].人民黄河,2014,36(10):92-94,109.
- [8] 童伟,韩霁昌,王欢元,等.毛乌素沙地砒砂岩与沙复配成土技术固沙效应[J].中国沙漠,2015,35(6):1467-1472.
- [9] 韩兆敏,姚云峰,郭月峰,等.砒砂岩区油松的茎流特征及其与环境因子的关系[J].生态环境学报,2017,26(7):1145-1151.
- [10] 刘龙,姚云峰,郭月峰,等.准格尔旗砒砂岩区三种典型造林树种蒸腾耗水研究[J].中国农业科技导报,2018,20(3):124-131.
- [11] 杨振奇,秦富仓,李晓琴,等.砒砂岩区主要造林树种枯落物及林下土壤持水特性[J].水土保持学报,2017,31(3):118-122.
- [12] 樊登星,余新晓,岳永杰,等.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(增刊2):177-181.
- [13] 陈倩,周志立,史琛媛,等.河北太行山丘陵区不同林分类型枯落物与土壤持水效益[J].水土保持学报,2015,29(5):206-211.
- [14] 张海涛,宫渊波,付万权,等.川南马尾松低效人工林不同改造模式后枯落物持水特性分析[J].水土保持学报,2016,30(4):136-141.
- [15] 陈百灵,朱玉杰,董希斌,等.抚育强度对大兴安岭落叶

- 松林枯落物持水能力及水质的影响[J].东北林业大学学报,2015,43(8):46-49,70.
- [16] 赵鸿雁,吴钦孝,刘国彬.黄土高原人工油松林水文生态效应[J].生态学报,2003,23(2):376-379.
- [17] 李超,董希斌,宋启亮.大兴安岭白桦低质林皆伐改造后枯落物水文效应[J].东北林业大学学报,2013,41(10):23-27.
- [18] 饶良懿,朱金兆,毕华兴.重庆四面山森林枯落物和土壤水文效应[J].北京林业大学学报,2005,27(1):33-37.
- [19] 程金花,张洪江,余新晓,等.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.
- [20] 张君玉,程金花,张洪江,等.晋西黄土丘陵区 3 个树种人工林枯落物的持水特性[J].西北农林科技大学学报(自然科学版),2012,40(10):69-74,81.
- [21] 庞梦丽,朱辰光,翟博超,等.河北省太行山区 3 种人工水土保持林枯落物及土壤水文效应[J].水土保持通报,2017,37(1):51-56.
- [22] 胡晓聪,黄乾亮,金亮.西双版纳热带山地雨林枯落物及其土壤水文功能[J].应用生态学报,2017,28(1):55-63.
- [23] Qi F, Zhang R H, Liu X, et al. Soil particle size distribution characteristics of different land-use types in the Funiu mountainous region [J]. Soil and Tillage Research,2018,184:45-51.
- [24] 惠淑荣,秦莹,刘强,等.辽东地区日本落叶松人工林凋落物层的持水性能研究[J].沈阳农业大学学报,2011,42(3):311-315.
- [25] 侯瑞萍,张克斌,郝智如.造林密度对樟子松人工林枯落物和土壤持水能力的影响[J].生态环境学报,2015,24(4):624-630.
- [26] 周志立,张丽玮,陈倩,等.木兰围场 3 种典型林分枯落物及土壤持水能力[J].水土保持学报,2015,29(1):207-213.
- [27] Zhao Y, Feng Q, Yang H D. Soil salinity distribution and its relationship with soil particle size in the lower reaches of Heihe River, Northwestern China[J]. Environmental Earth Sciences,2016,75(9):810.
- [28] 吴晓光,姚云峰,迟文峰,等.1990—2015 年内蒙古高原土壤风蚀时空差异特征分析[J].中国农业大学学报,2020,25(3):117-127.
- [29] 魏雅丽,贺玉晓,金杰,等.元谋干热河谷典型植被枯落物持水能力研究[J].干旱区资源与环境,2014,28(3):181-186.
- [30] 卢振启,黄秋嫻,杨新兵.河北雾灵山不同海拔油松人工林枯落物及土壤水文效应研究[J].水土保持学报,2014,28(1):112-116.
- [31] Du S, Yamanaka N, Yamamoto F, et al. The effect of climate on radial growth of *Quercus liaotungensis* forest trees in Loess Plateau, China[J]. Dendrochronologia,2007,25(01):29-36.
- [32] 赵赫然,王辉,黄蓉.华家岭防护林带土壤理化特性研究[J].干旱区资源与环境,2014,28(11):139-144.

(上接第 136 页)

- [5] 陈波,李少宁,鲁绍伟,等.北京大兴南海子公园 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 质量浓度变化特征[J].生态科学,2016,35(2):104-110.
- [6] Bullard J E, McTainsh G H, Pudmenzky C. Aeolian abrasion and modes of fine particle production from natural red dune sands: An experimental study[J]. Sedimentology,2004,51(5):1103-1125.
- [7] Shao Y. A model for mineral dust emission[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2001, 106 (17): 20239-20254.
- [8] 梅凡民,张小曳,鹿化煌,等.若干风蚀粉尘释放模型述评[J].中国沙漠,2004,24(6):791-797.
- [9] 南岭,董治宝.西部地区沙产业发展探讨[J].现代农业科技,2016(23):267-268.
- [10] 朱升贺.农田地表粉尘释放特征野外实验研究[D].兰州:兰州大学,2018.
- [11] 庄国顺,郭敬华,袁蕙,等.2000 年我国沙尘暴的组成、来源、粒径分布及其对全球环境的影响[J].科学通报,2001,46(3):191-197.
- [12] 孙悦超,麻硕士,陈智.保护性耕作农田和柠条带状配置草地防风蚀效果的风洞测试[J].农业工程学报,2017,33(11):140-146.
- [13] 赵永来,麻硕士,陈智,等.保护性耕作农田对近地表风速阻挡效果分析[J].农业工程学报,2011,27(10):33-38.
- [14] 赵永来,陈智,孙悦超,等.作物残茬覆盖农田地表土壤抗风蚀效应试验[J].农业机械学报,2011,42(6):38-42,37.
- [15] 范清成,王飞,穆兴民,等.保护性耕作对土壤风蚀的影响[J].中国水土保持科学,2011,9(3):1-5.
- [16] 王仁德,邹学勇,吴晓旭,等.半湿润区农田风蚀物垂直分布特征[J].水土保持学报,2009,23(5):39-43.
- [17] 刘铁军,赵显波,赵爱国,等.东北黑土地土壤风蚀风洞模拟试验研究[J].水土保持学报,2013,27(2):67-70.
- [18] 赵云.黄土区保护性耕作防土壤风蚀的风洞模拟实验研究[D].陕西 杨凌:西北农林科技大学,2013.
- [19] 林艺,李和平,肖波.东北黑土区农田土壤风蚀的影响因素及其数量关系[J].水土保持学报,2017,31(4):44-50.
- [20] 孙悦超,麻硕士,陈智,等.保护性耕作农田抗风蚀效应多因素回归分析[J].农业工程学报,2010,26(10):151-155.
- [21] 辜艳丹.干旱半干旱地区土壤的粉尘释放研究[D].兰州:兰州大学,2009.
- [22] 王雅倩.基于风洞实验的裸露农田土壤 PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 起尘特征研究[D].天津:天津师范大学,2019.
- [23] 王仁德,邹学勇,赵婧妍.半湿润地区农田土壤粉尘释放的风洞模拟研究[J].地理科学,2012,32(11):1364-1369.