网络出版时间:2016-12-26 11:04 DOI:10.13207/j.cnki.jnwafu.2017.02.014
网络出版地址:http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1390.S.20161226.1104.028.html

不同林分山杏灌木林枯落物持水性能研究

杨 荣,杨宏伟,刘丽英,吴秀花,郭永盛,刘清泉
(内蒙古自治区林业科学研究院,内蒙古 呼和浩特 010019)

[摘 要] 【目的】分析不同林分山杏灌木林枯落物持水性能的差异,为提高林分水源涵养能力和更好地配置林分结构奠定理论基础。【方法】以内蒙古赤峰市 4 种典型的山杏灌木林林分(天然山杏(*Armeniaca sibirica* (L.) Lam)林模式(CK)、山杏+苜蓿(*Medicago sativa*)模式(SM)、山杏嫁接大扁杏(*Prunus armeniaca*)模式(SD)、山杏+樟子松(*Pinus sylvestris* var. *momgolica* Litv.)+草模式(SZC))为研究对象,通过野外观测和浸水试验,调查枯落物的蓄积量,分析枯落物的持水能力与过程,并对枯落物持水量、失水速率与风干时间的相关关系进行研究。【结果】各林分枯落物蓄积量为 0.7~2.84 t/hm^2,由小到大表现为山杏+苜蓿>山杏+樟子松+草>天然山杏林>山杏嫁接大扁杏,且未分解层>分解层;各林分枯落物最大持水量表现为山杏+苜蓿(7.72 t/hm^2)>山杏+樟子松+草(6.97 t/hm^2)>天然山杏林(4.53 t/hm^2)>山杏嫁接大扁杏(2.02 t/hm^2),有效持水率为山杏+苜蓿(217.87%)>山杏+樟子松+草(214.32%)>山杏嫁接大扁杏(197.76%)>天然山杏林(181.60%);枯落物浸水风干试验表明,枯落物失水速率与风干时间符合对数函数关系。【结论】4 种不同林分山杏灌木林枯落物持水性能差异明显,其中山杏+苜蓿和山杏+樟子松+草的林分搭配枯落物持水性能较佳。

[关键词] 山杏灌木林;枯落物;持水特性
[中图分类号] S715.3,S715.7 [文献标志码] A [文章编号] 1671-9387(2017)02-0096-07

Water-holding capacity of litters in different *Armeniaca sibirica* (L.) Lam shrub forests

YANG Rong, YANG Hongwei, LIU Liying, WU Xiuhua,
GUO Yongsheng, LIU Qingquan
(*Inner Mongolia Academy of Forestry, Hohhot, Inner Mongolia* 010019, *China*)

Abstract: 【Objective】 The differences in water conservation ability of litter layers of different *Armeniaca sibirica* (L.) Lam shrub forests were compared to provide scientific basis for raising water conservation ability of forest and configuring stand structure. 【Method】 Four different *Armeniaca sibirica* (L.) Lam shrub forests, including *Armeniaca sibirica* (L.) Lam (CK), *Armeniaca sibirica* (L.) Lam+*Medicago sativa* (SM), *Prunus armeniaca* (SD), and *Armeniaca sibirica* (L.) Lam+*Pinus sylvestris* var. *momgolica* Litv. +grass (SZC), were investigated and studied to explore the litter amount, hydrological characteristics of litter layer, and the relations between water-holding capacity, water loss rate and air-drying time of litters using field survey and soaking extraction in Chifeng, Inner Mongolia. 【Result】 Among all types of litters, total litter amount ranged from 0.7−2.84 t/hm^2, with a decreasing order of SM>SZC>CK>SD. The contents decomposed layer were larger than that of non-decomposed layer. The maximum water-holding volumes of different forests litters were in the order of SM (7.72 t/hm^2)>SZC (6.97

[收稿日期] 2015-10-16
[基金项目] "十二五"农村领域国家科技计划项目"森林可持续经营关键技术研究与示范"(2012BAD22B0303)
[作者简介] 杨 荣(1985-),女,内蒙古巴彦淖尔人,助理研究员,硕士,主要从事林业生态、植物生理生态研究。
E-mail:2008yarong@163.com

t/hm²)＞CK (4.53 t/hm²)＞SD (2.02 t/hm²), and the effective water holding rates were in the order of SM (217.87%)＞SZC (214.32%)＞SD (197.76%)＞CK (181.60%). Soak and dry experiments demonstrated that water loss rate and drying time had remarkable logarithmic correlation.【Conclusion】The differences among these four *Armeniaca sibirica* (L.) Lam shrub forests were significant. SM and SZC were the best two among the four types.

Key words: *Armeniaca sibirica* (L.) Lam shrub forest; litter; water capacity characteristics

枯落物层作为森林地表的覆盖层和保护层，是森林生态系统结构的重要组成部分，与林冠层、土壤层共同构成了森林涵养水源的 3 个垂直层次[1]。枯落物层不仅可以通过分解自身向土壤输送养分[2]，而且因为其结构疏松，具有良好的持水性和透水性，可以有效截持降水以减小降雨对土壤的直接冲刷，并且还可以抑制土壤水分蒸发，阻延地表径流[3-4]。因此，枯落物的水源涵养能力是反映森林水源涵养能力的一个重要指标[5]。目前，国内外对于枯落物层持水性能的研究较多[6-9]，但山杏灌木林作为内蒙古特定生态环境的主要植被，专门针对其枯落物持水性能的研究还鲜见报道。此外，对于枯落物持水性能的研究大多都是通过计算其吸水速率来表征[10-12]，并未客观地模拟枯落物的自然失水状态，而用枯落物失水速率(充分吸水后风干测定)来表征其持水性能，更符合自然实际情况。在内蒙古赤峰市，山杏灌木林的主要搭配模式有天然山杏林、山杏＋苜蓿、山杏嫁接大扁杏、山杏＋樟子松＋草 4 种林分，但对于这些灌木林分枯落物持水性能的研究尚未见报道。为此，本研究以赤峰市林西县常见的 4 种山杏灌木林林分配置模式林下枯落物为研究对象，对其持水特性进行研究，并采用更符合自然实际情况的枯落物失水速率(充分吸水后风干测定)来表征其持水性能，以期揭示不同林分配置模式的山杏灌木林枯落物持水性能的变化规律，进而为当地山杏灌木林的结构改造以及最大限度实现其生态效益提供理论依据。

1　研究区概况

试验地位于赤峰市林西县新城子镇北郊的七合堂村，地理坐标为东经 43°14′～44°15′，北纬 117°38′～118°37′，属中温带大陆性季风气候。四季分明，风沙干旱严重，雨热同季，降水少而集中，日照充足，年平均气温 2.2 ℃，日照 2 900 h；降水量 360～380 mm，年蒸发量达 1 880.3 mm，是降水量的 4.95 倍；无霜期 12 d。土壤肥力水平是“缺磷少氮，钾相对有余，有机质含量中等”[13]。肥力分布规律是北高南低，变化幅度大。土壤有机质含量为 31.7 g/kg，全氮 1.8 g/kg，速效磷 4 mg/kg，速效钾 163 mg/kg[14]。

本研究于 2013 年 3 月在七合堂村对山杏林进行实地调查，根据当地山杏灌木林典型林分模式，共设置 12 块样地，分 4 种不同林分模式：天然山杏林模式(CK)、山杏＋苜蓿模式(SM)、山杏嫁接大扁杏模式(SD)、山杏＋樟子松＋草模式(SZC)，每种林分设置 3 个重复，面积均为 20 m×20 m，各样地基本情况及经营措施见表 1。

表 1　4 种山杏灌木林林分试验样地的基本情况

Table 1　Information of the 4 types of *Armeniaca sibirica* (L.) Lam shrub forests

林分 Type	林龄/年 Stand age	密度/(株·hm⁻²) Density	海拔/m Altitude	坡向 Aspect	平均地径/cm Average diameter	平均树高/cm Average tree height
CK	32	1 800～2 100	1 084	阳坡 Sunny slope	6.2	175.2
SM	12	2 222	1 032	阳坡 Cloudy slope	3.5	155.9
SD	12(山杏),4(大扁杏) 12(*Armeniaca sibirica* (L.)Lam), 4(*Prunus armeniaca*)	1 667	1 037	阴坡 Cloudy slope	4.7	228.3
SZC	12(山杏 *Armeniaca sibirica* (L.) Lam, 樟子松 *Pinus sylvestris* var. *momgolica* Litv.)	1 667	1 222	阴坡 Cloudy slope	3.7(山杏 *A. sibirica*) 7.9 樟子松 *Pinus sylvestris* var. *momgolica* Litv.)	134.9(山杏 *A. sibirica*) 267.3 樟子松 *Pinus sylvestris* var. *momgolica* Litv.)

2 研究方法

2.1 林下枯落物采集及蓄积量测定

在研究区的4种林分模式样地内各设置4个1 m×1 m的重复样方[15],用小铲子划出边界,用砍刀、枝剪等工具细心除去样方内植物活体部分,用钢卷尺测量各层厚度。按未分解层(AO层:新枯落物或枯落物色泽鲜艳,无明显分解斑)和分解层(AOO层:枯落物色泽暗淡发黑,分解斑明显且较多)2层进行收集,然后装入已标记的布袋,迅速称其鲜样质量;将上述样品带回实验室在干燥通风处放置10 d以上,直至无潮湿感时,称其质量作为枯落物风干质量;最后于85 ℃条件下烘干8 h后称质量,推算单位面积干质量和蓄积量[16-17]。

2.2 枯落物最大持水量和持水能力测定

2.2.1 *枯落物层持水量* 用室内浸泡法测定。首先将枯落物烘干并称质量,混合均匀后选择外观较为整洁的枯枝落叶20 g,每种3个重复,装入已称质量的尼龙网袋中,再将装有枯落物的尼龙网袋置于盛有清水的容器中,水面略高于尼龙袋上沿;首先让枯落物充分吸水24 h,然后称质量,即为枯落物的最大持水量[18-19]。

2.2.2 *枯落物持水能力* 采用室内浸泡法测定。将浸水24 h的枯落物称湿质量后,测定该枯落物自捞出来后放置在沙堆上1,2,4,8,12和24 h时的湿质量。枯落物持水能力用失水速率表征,失水速率越小,说明其持水能力越强。

2.3 数据分析

采用SPSS 13.0统计软件和Microsoft Excel 2007对数据进行整理与分析。枯落物自然持水率(R_0,%)、最大持水率(Rh_{max},%)、有效持水率(R_{sv},%)、最大吸湿比(Rx_{max})和失水速率(V,g/(kg·h))的计算公式为[20-21]:

$$R_0=(G_0-G_d)/G_0\times100\%;$$

$$Rh_{max}=(G_{24\,h}-G_d)/G_d\times100\%;$$

$$R_{sv}=0.85Rh_{max}-R_0;$$

$$Rx_{max}=G_{24\,h}/G_d;$$

$$V=(G_t-G_{t+1})/(G_d\cdot\Delta t)。$$

式中:R_0、Rh_{max}、R_{sv}、Rx_{max}分别为枯落物自然水率(%)、最大持水率(%)、有效持水率(%)和最大吸湿比,G_0、G_d、$G_{24\,h}$分别为枯落物自然状态下鲜质量、枯落物烘干质量及浸水24 h后质量(g),V为枯落物的失水速率(g/(kg·h)),G_t和G_{t+1}分别为枯落物风干时间为t或$t+1$时的质量(g),Δt为枯落物前后失水时间间隔,0.85为有效拦蓄系数。

3 结果与分析

3.1 不同林分山杏灌木林枯落物的蓄积量

林地的植被种类、生长状况、枯落物输入量、分解速率、积累年限以及枯落物所处的水热条件等综合因素决定着枯落物的蓄积量(又称现存量)大小[22]。对赤峰林西县不同林分山杏灌木林枯落物的蓄积量进行调查,结果如表2所示。

表2 不同林分山杏灌木林枯落物的蓄积量

Table 2 Litter accumulation amounts in different *Armeniaca sibirica* (L.) Lam shrub forests

林分 Type	未分解层(AO层) Non-decomposed layer(AO layer)		分解层(AOO层) Decomposed layer(AOO layer)		总蓄积量/(t·hm^{-2}) Total accumulation amount
	枯落物蓄积量/(t·hm^{-2}) Litter accumulation amount	组成比例/% Composition proportion	枯落物蓄积量/(t·hm^{-2}) Litter accumulation amount	组成比例/% Composition proportion	
CK	0.54 b	26.09	1.53 ab	73.91	2.07
SM	0.87 ab	30.63	1.97 a	69.37	2.84
SD	0.25 c	34.08	0.49 b	65.92	0.74
SZC	1.32 a	61.11	0.84 ab	38.89	2.16

注:同列数据后标不同小写字母表示差异达$P=5\%$的显著水平。

Note: Different small letters indicate significant difference at the $P=5\%$ level.

由表2可知,各林分枯落物的蓄积量存在较大差异。枯落物总蓄积量以山杏+苜蓿(SM)模式为最大,达2.84 t/hm^2,其次为山杏+樟子松+草(SZC)模式和天然山杏林(CK)模式,分别为2.16和2.07 t/hm^2,而山杏嫁接大扁杏(SD)模式枯落物蓄积量最小,只有0.74 t/hm^2。SD模式枯落物蓄积量相对较小,是因为该模式为人工嫁接模式,林地当年进行了深翻除草,地表无灌草层覆盖。各林分模式下枯落物未分解层和已分解层所占比例不尽相同,除SZC模式为未分解层(AO层)>分解层

(AOO 层)外,其余 3 种林分模式均表现为分解层(AOO 层)>未分解层(AO 层),这可能是由于当年采样季降雨较多,有利于枯落物的分解转化。

此外,对于 SM 模式而言,苜蓿地氮素含量较高,微生物活跃,枯落物分解较高,所以 AOO 层所占比例较大;但在 SZC 模式中,樟子松属于针叶树种,枯落物质地较硬且含有油脂而不易分解,导致 SZC 模式枯落物蓄积量相对较大,且未分解层所占比例大于分解层。

3.2　不同林分山杏灌木林枯落物的持水性能

大气降水经过林冠层到达林地,首先被枯落物层吸持,枯落物层在森林水源涵养中具有极其重要的作用,其不仅能拦截降水,避免地表直接被雨滴冲击而阻滞径流,而且枯落物层含有的大量腐殖质可显著改善土壤结构,提高土壤渗透性。因而,枯落物持水能力是评价林地水源涵养功能的一个重要指标[23-24]。对赤峰林西县不同林分山杏灌木林下枯落物持水能力的分析结果如表 3 所示。

表 3　不同林分山杏灌木林枯落物持水能力的比较

Table 3　Comparison of water holding capacity of different *Armeniaca sibirica* (L.) Lam shrub forests

林分 Type	最大持水量/(t·hm^{-2}) Maximum water-holding volume			最大持水率/% Maximum water-holding rate			有效持水率/% Effective water-holding rate		
	AO 层 AO layer	AOO 层 AOO layer	总和 Total	AO 层 AO layer	AOO 层 AOO layer	加权平均 Average	AO 层 AO layer	AOO 层 AOO layer	加权平均 Average
CK	1.17	3.36	4.53	242.45	214.02	228.23	191.72	171.48	181.60
SM	2.52	5.20	7.72	287.37	263.23	275.30	227.21	208.52	217.87
SD	0.72	1.30	2.02	287.45	262.78	275.12	188.68	206.84	197.76
SZC	1.81	5.15	6.96	269.92	302.33	286.13	213.34	215.30	214.32

枯落物的持水能力一般用干物质的最大持水率、最大持水量表示[25],本研究以枯落物浸水 24 h 后的持水率为最大持水率。由表 3 可以看出,所研究的 4 种模式中,最大持水量依次表现为:SM(7.72 t/hm^2)>SZC(6.96 t/hm^2)>CK(4.53 t/hm^2)>SD(2.02 t/hm^2)。该结果表明,最大持水量与其蓄积量有很大关系,本研究中枯落物蓄积量大的林地其最大持水量也大,持水率对其也有较大影响。同时,这几种模式林分枯落物分解层(AOO 层)的最大持水量均大于未分解层(AO 层)。4 种山杏灌木林分枯落物最大持水率变化为 228.23%~286.13%,其中 SZC 模式的最大持水率最高,对照组 CK 模式最大持水率最低。除 SZC 模式外,其余各林分的最大持水率均以未分解层(AO 层)>分解层(AOO 层)。同一模式林分的最大持水率与最大持水量呈现出不同的规律,这是因为最大持水率大小还与枯落物本身的生物量和结构有关[26]。SD 模式枯落物的蓄积量较小,但其最大持水率较高,这可能是因为大扁杏叶子相对较大,相对草本及针叶较易吸持水分。

最大持水量(率)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[27],因为最大持水量(率)是枯落物试样浸水 24 h 后的测定结果,而在自然条件下,林地坡面上一般不会出现较长时间的浸水条件,落到枯落物层上的雨水,一部分被其拦蓄,一部分则通过孔隙很快入渗到土壤,而剩余部分作为地表径流流出。当降雨量达到 20~30 mm 以后,不论哪种植被类型及其枯落物层,其实际持水率约为最大持水率的 85%左右[28]。因此在自然条件下,枯落物最大持水量并不等于其对降雨的有效调蓄量。所以,用最大持水率来估算枯落物层对降雨的拦蓄能力,结果可能有些偏高,不能准确反映其对降雨的实际拦蓄效果,故一般用有效持水率估算枯落物层对降雨的实际拦蓄量。表 3 结果显示,4 种模式下山杏灌木林枯落物的有效持水率依次为 SM>SZC>SD>CK。尽管 SZC 的最大持水率最大,但其有效持水率低于 SM 模式,这主要是因为苜蓿枯落物的现存量较高所致。

应用 SPSS 13.0 软件对枯落物蓄积量、最大持水量、最大持水率、吸湿比和有效持水率进行 Pearson 相关分析,结果见表 4。由表 4 可知,最大持水量与蓄积量、最大持水率与吸湿比、最大持水率与有效持水率均在 0.01 水平(双侧)上显著相关,说明枯落物蓄积量直接决定其持水能力;另外,最大持水率与有效持水率显著相关,而其他各指标之间均不存在显著相关性。

3.3　不同林分山杏灌木林枯落物的持水速率

通常人们将枯落物浸水 24 h(多数植物在浸泡 24 h 后其吸水达到饱和[29])分段测定其含水量进而测定其吸水速率,用以表征枯落物吸水能力的大小。但作者认为,枯落物持水能力应该为其在充分吸水状态下,当停止供水后枯落物维持其自身含水量的

能力。所以,笔者采用 24 h 浸泡枯落物使其充分吸水,然后再将其放置在沙堆上,分时间段测定其含水量,失水速率越慢,说明其保水能力越强[30]。不同林分模式山杏灌木林枯落物的失水速率在同一时间内各不相同(图 1),但其随放置时间延长的变化趋势大致相同。

表 4 不同山杏灌木林枯落物各指标的相关性分析

Table 4 Correlation analysis of each index among different *Armeniaca sibirica* (L.) Lam shrub forests

项目 Item	蓄积量 Accumulation amount	最大持水量 Maximum water-holding volume	最大持水率 Maximum water-holding rate	吸湿比 Moisture absorption ratio	有效持水率 Effective water-holding rate
蓄积量 Accumulation amounts	1	0.953**	0.006	0.007	0.082
最大持水量 Maximum water-holding volume		1	0.279	0.280	0.290
最大持水率 Maximum water-holding rate			1	1.000**	0.838**
吸湿比 Moisture absorption ratio				1	0.836**
有效持水率 Effective water-holding rate					1

注:** 表示在 0.01 水平(双侧)上显著相关。

Note: ** indicates significant correlation at the 0.01 level (bilateral).

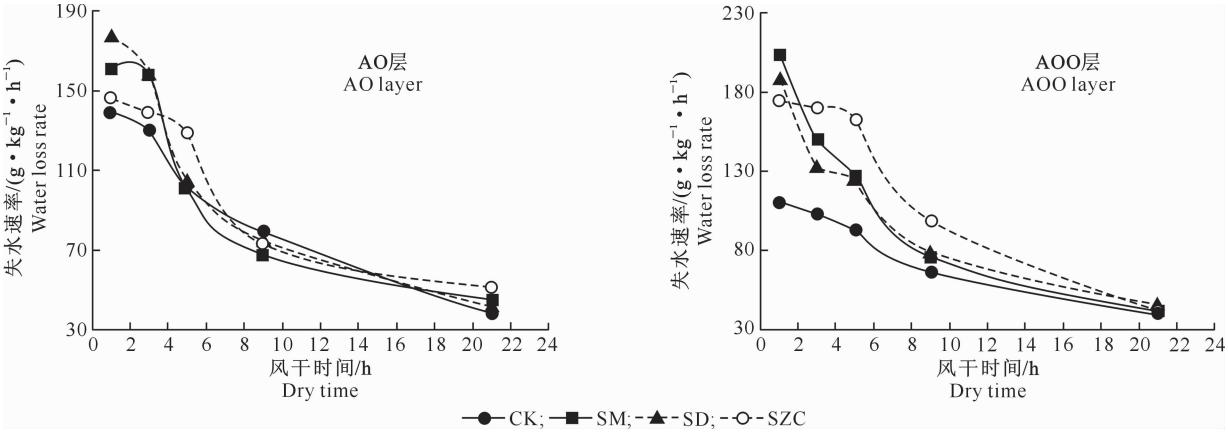

图 1 山杏灌木林不同层枯落物失水速率与风干时间的关系

Fig. 1 Relationship between dehydrating rate and drying time of different layers

由图 1 可知,未分解层和分解层枯落物在开始风干时失水速率都很高,这是因为充分吸水的枯落物刚放置在沙堆上时,枯落物细胞间水势和外界差值较大,因此失水速率较高,后期失水速率下降明显减慢,但一直处于下降趋势,直到枯落物含水量达到 0,即彻底风干为止,这与以往学者认为枯落物的吸水速率于后期渐趋于平缓,直至达到饱和[5,25,28]的结果有所不同。

对于未分解层(AO 层)来说,失水速率分别表现为 CK>SZC>SM>SD,也就意味着就 AO 层而言,SD 林分模式的枯落物的持水速率最大,CK 模式最小。分解层(AOO 层)失水速率大小表现为 CK>SD>SZC>SM,其持水速率应该以 SM 模式最大,CK 模式最小。在整个风干过程中,最初的 5 h 内枯落物失水速率较快,之后呈缓慢下降趋势。对不同林分枯落物失水速率和风干时间进行相关性和回归分析,结果见表 5。

表 5 不同林分山杏灌木林枯落物的失水速率与风干时间的回归方程

Table 5 Regression equations between dehydrating rate and drying time of different *Armeniaca sibirica* (L.)Lam shrub forests

林分 Type	AO 层 AO layer		AOO 层 AOO layer	
	回归方程 Regression equation	R^2	回归方程 Regression equation	R^2
CK	$Y=-47.72\ln x+187.37$	0.939 4	$Y=-47.37\ln x+189.19$	0.987 1
SM	$Y=-42.79\ln x+174.29$	0.880 7	$Y=-54.72\ln x+206.49$	0.985 9
SD	$Y=-34.20\ln x+162.01$	0.836 5	$Y=-45.23\ln x+201.48$	0.801 3
SZC	$Y=-34.01\ln x+151.87$	0.923 9	$Y=-24.10\ln x+120.41$	0.892 2

由表 5 可见，不同分解级枯落物失水速率与风干时间均呈现以下关系：

$$Y=a\ln x+b。$$

式中：Y 为枯落物失水速率(g/(kg·h))；x 为风干时间(h)；a 为方程系数；b 为方程常数项。

4　结　论

1)对不同林分模式山杏灌木林枯落物蓄积量的研究表明：枯落物蓄积总量表现为山杏＋苜蓿(SM)＞山杏＋樟子松＋草(SZC)＞天然山杏林(CK)＞山杏嫁接大扁杏(SD)；未分解层(AO 层)枯落物蓄积量为山杏＋樟子松＋草(SZC)＞山杏＋苜蓿(SM)＞天然山杏林(CK)＞山杏嫁接大扁杏(SD)；分解层(AOO 层)枯落物蓄积量为山杏＋苜蓿(SM)＞天然山杏林(CK)＞山杏＋樟子松＋草(SZC)＞山杏嫁接大扁杏(SD)。除樟子松因松针枯落物质地较硬且含有油脂而不易分解，导致 SZC 模式未分解层枯落物蓄积量大于分解层之外，总体而言，各模式枯落物的分解层蓄积量所占比例大于未分解层。

2)对 4 种不同林分模式山杏灌木林枯落物持水性能的研究表明：最大持水量依次表现为山杏＋苜蓿(7.72 t/hm^2)＞山杏＋樟子松＋草(6.97 t/hm^2)＞天然山杏林(4.53 t/hm^2)＞山杏嫁接大扁杏(2.02 t/hm^2)，有效持水率表现为山杏＋苜蓿＞山杏＋樟子松＋草 ＞山杏嫁接大扁杏＞天然山杏林。相关性分析表明，最大持水量与蓄积量显著相关，且最大持水率与吸湿比、有效持水率均在 0.01 水平(双侧)上显著相关，说明枯落物蓄积量直接决定其持水能力。

3)在充分吸水条件下进行风干，研究 4 种林分模式山杏灌木林枯落物的持水速率，结果表明山杏嫁接大扁杏、山杏＋樟子松＋草以及山杏＋苜蓿模式枯落物的持水速率均高于天然山杏林模式；总体而言，分解层和未分解层枯落物在开始风干时失水速率均较高，后期失水速率明显减慢，且一直处于下降趋势，直到枯落物含水量达到 0，即彻底风干为止。枯落物失水速率(Y)与风干时间(x)的关系为：$Y=a\ln x+b$。

4)山杏＋苜蓿(SM)模式和山杏＋樟子松＋草(SZC)是 4 种山杏灌木林中枯落物持水性能(蓄积量、最大持水量、有效持水率、持水速率)最佳的林分配置模式，其林地的水源涵养功能最佳。主要是因为苜蓿地有机质含量高，利于微生物生存，从而使枯落物分解率较高，进而影响持水性能；而樟子松林分因为其针叶型枯落物的油脂含量较高，吸水后不易挥发，因此阔叶型枯落物更能有效拦蓄降水。

[参考文献]

[1] 代海燕. 大青山主要森林类型生态效益的研究与评价 [D]. 呼和浩特：内蒙古农业大学，2008.
Dai H Y. Evaluation and study on the ecological benefits of main forest type in Daqing mountain [D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2008.

[2] Arunachalam A, Kusum A, andey H N. Fine litter fall and nutrient dynamics during forest regrowth in the humid subtropics of north-eastern India [J]. For Ecol Manage, 1998, 110(1/3): 209-219.

[3] 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.
Cheng J H, Zhang H J, Yu X X, et al. Water holding capacity characteristic of ground cover and soil under pure *Abies fabri* forest on the Gongga mountain [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2002, 24(3): 45-49.

[4] Wang C, Zhao C Y, Xu Z L, et al. Effect of vegetation on soil water retention and storage in a semi-arid alpine forest catchment [J]. Journal of Arid Land, 2013, 5(2): 207-219.

[5] 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.
Hui S R, Qin Y, Liu Q, et al. A study on the water-holding properties of litter layer for *Larix kaempferi* forests of eastern region in Liaoning province [J]. Journal of Shenyang Agricultural University, 2011, 42(3): 311-315.

[6] 张卫强，李召青，周　平，等. 东江中上游主要森林类型枯落物的持水特性 [J]. 水土保持学报，2010，24(5)：130-134.
Zhang W Q, Li Z Q, Zhou P, et al. Water-holding characteristics of typical forests types litter in the upper and middle reaches of Dongjiang watershed [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2010, 24(5): 130-134.

[7] Kavvadias V A, Alifragis D, Tsiontsis A, et al. Litter fall, litter accumulation and litter decomposition rates in four forest ecosystems in Northern Greece [J]. Forest Ecology and Management, 2001, 144(1/3): 113-127.

[8] 蒋秋怡. 林地地上部分的持水性能及其对林地水文学性质的影响 [J]. 浙江林学院学报，1989，6(2)：176-181.
Jiang Q Y. Water capacity of aerial part biomass and its effects on hydrological characters in the forest land [J]. Journal of Zhejiang Forestry College, 1989, 6(2): 176-181.

[9] 王　波，张洪江，徐丽君，等. 四面山不同人工林枯落物储量及其持水特性研究 [J]. 水土保持学报，2008，22(4)：90-94，99.
Wang B, Zhang H J, Xu L J, et al. Reserves and water capacity characteristics of different species of litter in Simian mountain [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2008, 22(4): 90-94, 99.

[10] 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.
Chen Q,Zhou Z L,Shi C Y,et al. Litter and soil water-holding capacity of different typical forests in hilly region of Taihang mountains in Hebei province [J]. Journal of Soil and Water Conservation,2015,29(5):206-211.

[11] 赵雨虹,范少辉,夏 晨,等.亚热带4种常绿阔叶林林分枯落物储量及持水功能研究[J].南京林业大学学报(自然科学版),2015,39(6):93-98.
Zhao Y H,Fan S H,Xia C,et al. A study on reserves and water holding function of litter in four types of evergreen broad-leaved forest in subtropical zone of China [J]. Journal of Nanjing Forestry University(Natural Sciences Edition),2015,39(6):93-98.

[12] 郑晶晶,蔡锰柯,林 宇,等.6种不同沿海防护混交林凋落叶持水性能比较[J].水土保持通报,2015,35(5):111-116.
Zheng J J,Cai M K,Li Y,et al. Comparative study on water-holding capacity of litters in six different mixed forests for coastal protection [J]. Journal of Soil and Water Conservation,2015,35(5):111-116.

[13] 张凤鹤.林西县林地资源保护与利用研究[D].呼和浩特:内蒙古农业大学,2012.
Zhang F H. Research of protection and utilization to forest land resource in Linxi county [D]. Hohhot:Inner Mongolia Agricultural University,2012.

[14] 刘文峰,张丽芳,于树台,等.林西县森林生态系统分析[J].内蒙古林业调查设计,2004,27(1):8-10.
Liu W F,Zhang L F,Yu S T,et al. Analysis of forest ecosystem in Linxi county [J]. Inner Mongolia Forestry Investigation and Design,2004,27(1):8-10.

[15] Rao L Y,Zhu J Z. Hydrological effects of forest litter and soil in the Simianshan Mountains in Chonging,China [J]. Frontiers of Forestry in China,2007,2(2):157-162.

[16] 邵方丽,余新晓,杨志坚,等.天然杨桦次生林表层土壤水分与枯落物的空间异质性[J].水土保持学报,2012,26(3):199-204.
Shao F L,Yu X X,Yang Z J,et al. Spatial heterogeneity of tops oil moisture and litter lay in natural *Populus davidiana-Betula platyphylla* secondary forests [J]. Journal of Soil and Water Conservation,2012,26(3):199-204.

[17] 常雅军,陈 琦,曹 靖,等.甘肃小陇山不同针叶林凋落物量、养分储量及持水特性[J].生态学报,2011,31(9):2392-2400.
Chang Y J,Chen Q,Cao J,et al. Litter amount and its nutrient storage and water holding characteristics under different coniferous forest types in Xiaolong mountajn Qansu province [J]. Acta Ecologica Sinica,2011,31(9):2392-2400.

[18] 谈正鑫,万福绪,张 涛.盱眙人工林枯落物及土壤水文效应研究[J].水土保持研究,2015,22(4):184-188.
Tan Z X,Wan F X,Zhang T. Hydrological effect of litter and soil in planted forest in Xuyi country [J]. Reserch of Soil and Water Conservation,2015,22(4):184-188.

[19] 曾丹娟,徐广平,黄玉清,等.北部湾经济区枯落物及其林下土壤持水能力研究[J].水土保持研究,2015,22(4):210-220.
Zeng D J,Xu G P,Huang Y Q,et al. Study on different forest litter and soil water-holding capacity in Gungxi North Gulf economic zone [J]. Reserch of Soil and Water Conservation,2015,22(4):210-220.

[20] 赵一鹤,赖建东,杨宇明,等.云南丽江拉市海汇水区不同森林枯落物的持水性能[J].林业科学研究,2014,27(3):410-416.
Zhao Y H,Lai J D,Yang Y M,et al. Study of litters' water retention capacity under different forest communities in the Lashi lake catchment, Lijiang city, Yunnan province, China [J]. Forest Research,2014,27(3):410-416.

[21] 王卫军,赵婵璞,姜 鹏,等.塞罕坝华北落叶松人工林水源涵养功能研究[J].中南林业科技大学学报,2013,33(2):66-73.
Wang W J,Zhao C P,Jiang P,et al. Study on water conservation function of *Larix principis-rupprechtii* Mayr plantation in Saihanba forest farm,Hebei province [J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2013, 33(2):66-73.

[22] 郑江坤,王婷婷,付万全,等.川中丘陵区典型林分枯落物层蓄积量及持水特性[J].水土保持学报,2014,28(3):87-92.
Zheng J K,Wang T T,Fu W Q,et al. Storage and water holding characteristics of the litter layer of typical forest types in the central Sichuan hilly region [J]. Journal of Soil and Water Conservation,2014,28(3):87-92.

[23] 金 铭.祁连山水源涵养林林冠层与枯落物层水文机理研究[D].兰州:甘肃农业大学,2006.
Jin M. Hydrology mechanism study on forest canopy and litter layers of water conservation forest in Qilian mountains [D]. Lanzhou:Gansu Agricultural University,2006.

[24] 王晓学,沈会涛,李叙勇,等.森林水源涵养功能的多尺度内涵、过程及计量方法[J].生态学报,2013,33(4):1019-1030.
Wang X X,Shen H T,Li X Y,et al. Concepts,processes and quantification methods of the forest water conservation at the multiple scales [J]. Acta Ecologica Sinica,2013,33(4):1019-1030.

[25] 韩进斌.五台山地区5种林分类型水源涵养功能研究[J].山西林业科技,2013,42(3):32-34.
Han J B. Water conservation function research of five forests in Wutai mountain region [J]. Shanxi Forestry Science and Technology,2013,42(3):32-34.

[26] 孟好军,刘贤德,张宏斌,等.祁连山人工林凋落物和土壤水分特性的研究[J].中南林业科技大学学报,2013,33(2):11-15.
Meng H J,Liu X D,Zhang H B,et al. Study on litters and soil moisture characteristics of different plantationsin Qilian mountains [J]. Journal of Central South University of Forestry and Technology,2013,33(2):11-15.

(下转第110)

[22] 王 娟,姚云峰,郭月峰,等.科尔沁沙地南缘小叶锦鸡儿和黄柳灌丛生态系统碳汇动态研究[J].生态环境学报,2015,24(11):1785-1790.
Wang J,Yao Y F,Guo Y F,et al. The carbon sink dynamic research on the *Caragana microphylla* and *Salix gordejevii Shrub* ecosystem in the southern edge of Horqin Sandland [J]. Ecology and Environmental Sciences,2015,24(11):1785-1790.

[23] 董云中,张 强,郜春花,等.定植年限对小叶锦鸡儿灌丛及根际土壤养分与酶活力的影响[J].农学学报,2014,4(1):29-32.
Dong Y Z,Zhang Q,Gao C H,et al. Effect of soil nutrient and enzyme activity in colonization age of *Caragana microphylla* Lam. thickets and rhizosphere [J]. Journal of Agriculture,2014,4(1):29-32.

[24] 牛存洋,阿拉木萨,宗 芹,等.科尔沁沙地小叶锦鸡儿地上-地下生物量分配格局[J].生态学杂志,2013,32(8):1980-1986.
Niu C Y,Ala M S,Zong Q,et al. Allocation patterns of above- and below-ground biomass of *Caragana microphylla* in Horqin sandy land [J]. Chinese Journal of Ecology,2013,32(8):1980-1986.

[25] 于 洋,贾志清,朱雅娟,等.高寒沙地乌柳防护林碳库随林龄的变化[J].生态学报,2015,35(6):1752-1760.
Yu Y,Jia Z Q,Zhu Y J,et al. Changes of carbon pools of alpine sandy *Salix cheilophila* shelterbelts with stand age [J]. Acta Ecologica Sinica,2015,35(6):1752-1760.

[26] Piao S L,Fang J Y,Ciais P,et al. The carbon balance of terrestrial ecosystems in China [J]. Nature,2009,458(7241):1009-1013.

(上接第102页)

[27] 李道宁.江西省大岗山主要森林类型水源涵养功能研究[D].哈尔滨:东北林业大学,2014.
Li D N. Study on the function of water conservation with three main forest types in Dagangshan mountain of Jiangxi province [D]. Harbin:Northeast Forestry University,2014.

[28] 宫渊波,麻泽龙,陈林武,等.嘉陵江上游低山暴雨区不同水土保持林结构模式水源涵养效益研究[J].水土保持学报,2004,18(3):28-32,36.
Gong Y B,Ma Z L,Chen L W,et al. Research on effects of water conservation in different types of water and soil conservation forest in low hill heavy rain area of upper reach of Jialing river [J]. Journal of Soil and Water Conservation,2004,18(3):28-32,36.

[29] 聂雪花.祁连山灌木林水源涵养功能的研究[D].兰州:甘肃农业大学,2009.
Nie X H. Study on water conservation function of shrub in Qilian mountains [D]. Lanzhou:Gansu Agricultural University,2009.

[30] 刘 欣,陶建平,黄 茹,等.重庆石灰岩地区3种林分林下枯落物持水能力比较[J].中国生态农业学报,2008,16(3):712-717.
Liu X,Tao J P,Huang R,et al. Water-holding capacity of forest litter in the mountain limestone region of Chongqing [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture,2008,16(3):712-717.