

# 白龙江上游5种典型灌木林枯落物蓄积量及持水特性

齐瑞, 杨永红, 陈宁, 曹秀文, 刘锦乾, 王飞, 赵阳

(甘肃省白龙江林业管理局林业科学研究所, 甘肃 武都 746010)

**摘要:** 采用野外实地观测与室内浸水法, 对白龙江上游5种典型灌木林(荚蒾、甘肃柳、中华柳、箭竹、绣线菊)林地枯落物的蓄积量、持水量、持水率和吸水速率进行了研究。结果表明: 5种典型灌木林林地枯落物蓄积量大小依次为箭竹林>甘肃柳林>荚蒾林>中华柳林>绣线菊林。5种灌丛类型枯落物半分解层的持水量均高于未分解层, 中华柳未分解层持水量最高, 箭竹半分解层持水量最高, 绣线菊未分解层和半分解层持水量都是最小, 整个枯落层最大持水量大小为中华柳>箭竹>荚蒾>甘肃柳>绣线菊; 5种典型灌丛林不同分解程度枯落物的持水量与浸水时间存在对数关系, 其吸水速率与浸水时间呈幂函数关系。

**关键词:** 灌木林; 枯落物; 蓄积量; 持水特性; 白龙江上游

中图分类号: S715.3

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2016)06-0123-05

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcb.2016.06.022

## Litter Storage and Water Holding Capacity Characteristics of Five Typical Shrubberies in the Upper Reaches of Bailongjiang River of Gansu Province

QI Rui, YANG Yonghong, CHEN Ning, CAO Xiuwen, LIU Jinqian, WANG Fei, ZHAO Yang

(Institute of Forestry Science, Bailongjiang Forestry Management Bureau of Gansu Province, Wudu, Gansu 746010)

**Abstract:** Shrubs are important components of forest in the upper reaches of Bailongjiang River. Previous studies on water holding characteristics in this region were focused more on the arbor forest, but less on shrubberies. By means of field survey and soaking extraction, five typical shrubberies (*Viburnum dilatatum* Thunb., *Salix fargesii* Burk., *Salix cathayana* Diels., *Fargesia spathacea* Franch., *Spiraea schneideriana* Rehd.) were selected for the present study. The results showed that litter storage in the five typical shrubberies followed the order of *F. spathacea*>*S. fargesii*>*V. dilatatum*>*S. cathayana*>*S. schneideriana*. The half-decomposed litters had a larger water holding capacity than un-decomposed litters in the five typical shrubberies. The water holding capacity of *S. cathayana* un-decomposed litters was the highest among different shrubberies, the half-decomposed litters of *F. spathacea* was the highest among different shrubberies, the un-decomposed and half-decomposed litter layers of *S. schneideriana* were both the lowest among different shrubberies. The maximum water holding capacity of the whole litter layer was in the order of *S. cathayana*>*F. spathacea*>*V. dilatatum*>*S. fargesii*>*S. schneideriana*. Water holding capacity of the litters of different decomposition degree changed logarithmically with soaking time, and the water absorption rate followed a power function.

**Keywords:** shrubbery; litter; storage; water holding capacity characteristics; the upper reaches of Bailongjiang River

白龙江流域地处青藏高原东北边缘、长江支流嘉陵江上游, 是秦巴山地重要的水源涵养区, 在长江上游水土保持及水源涵养等方面发挥着不可替代的作用, 是长江流域生态屏障的关键区之一<sup>[1]</sup>, 但由于其地处西秦岭与青藏高原东缘褶皱带, 地形复杂, 生态环境脆弱易变, 且在历史上经历过大规模森林采伐以

及林区内原居民长期生产活动干扰, 使林区植被和土壤退化严重, 滑坡、泥石流等自然灾害多发, 水土流失严重, 2010年舟曲特大山洪泥石流造成了巨大的生命财产损失<sup>[2]</sup>; 为此, 开展水土流失治理, 改善森林生态环境是林区管理首要任务, 加快研究各植被类型的水土保持功能也显得尤为重要。

收稿日期: 2016-06-01

资助项目: 甘肃省青年科技基金计划项目(145RJYK278); 甘肃省陇原青年创新人才计划、甘肃省科技支撑计划项目(1104FKCK119); 甘肃省林业科技项目(2015kj048, 2015kj051); 甘肃省科技支撑计划项目(144FKCK072)

第一作者: 齐瑞(1987—), 男, 硕士研究生, 助理工程师, 主要从事森林生态研究。E-mail: lovefy201311@163.com

通信作者: 杨永红(1968—), 男, 本科, 高级工程师, 主要从事森林生态研究。E-mail: yyhong1968@126.com

灌丛群落作为陆地生态系统中的一个重要生态类型,不仅在群落演替过程中起着重要的作用,也是重要的水源涵养林组成成分,在区域生态环境保护和替代能源方面起着非常重要的作用<sup>[3]</sup>;灌木树种具有抗逆性强、适应范围广的特点,而且可以有效的涵养水源,防治土壤侵蚀,控制水土流失<sup>[4]</sup>,并且灌木林枯落物层对森林水土保持和水源涵养功能影响甚大,在白龙江林区的水文生态功能中有着特殊的不可替代的作用。以往的枯落物持水特性的研究多集中在乔木林<sup>[5-7]</sup>,关于灌木林的研究特别是灌木林枯落物持水特性研究的资料甚少<sup>[8-9]</sup>。通过对灌丛枯落物厚度、累积量和持水性能的研究,将有助于对白龙江森林保持水土和涵养水源机理的深入认识。因此,本文通过研究白龙江上游 5 种典型灌木林(荚蒾、甘肃柳、中华柳、箭竹、绣线菊)枯落物层的持水特性,旨在充分认识灌木林枯落物的水源涵养、水土保持功能,为白龙江上游水源涵养林和生态环境的建设提供科学的理论指导。

## 1 研究地区与研究方法

### 1.1 研究区概况

研究区位于甘肃省南部,甘南藏族自治州舟曲县境内沙滩森林公园(103°57′02″—104°38′28″E,33°13′09″—33°51′31″N),属于长江水系嘉陵江支流的白龙江中、上游,海拔为 2 360~4 100 m,地貌以高山峡谷为主,气候以北温带高寒湿润为主,多年平均气温 4.3~5.7 °C,多年平均降水量 448.9~911.6 mm,土壤类型属于棕壤、褐土。植被类型主要以云、冷杉等亚高山针叶林为主。

上世纪 80 年代以前,白龙江林区乱砍滥伐现象严重,导致大面积的针阔混交林退化为落叶阔叶灌丛,生物多样性受到破坏,水土流失严重,泥石流灾害频繁。80 年代后期,开始利用粗枝云杉(*Picea asperata* Mast.)、青海云杉(*Picea crassifolia* Kom.)、青杆(*Picea wilsonii* Mast.)等树种进行大规模的植被恢复,其中由于造林不及时或不成功,人工林进行次生演替也形成大面积灌丛群落。

### 1.2 研究方法

1.2.1 枯落物采集与蓄积量测定 2014 年 7 月,在对白龙江上游灌丛实地调查的基础上,在研究区选择具有代表性的 5 种灌丛的样地,分别为荚蒾、甘肃柳、中华柳、箭竹、绣线菊灌木林地,在各灌木林地内设置 20 cm×20 cm 的小样方 3 个,分未分解层和半分解层收集其中的枯落物,采用四分法取样称重,置于烘箱中 85 °C 烘干至恒重,称重并计算枯落物自然含水量,据此推算单位面积的枯落物蓄积量。

1.2.2 枯落物持水特性的测定 在烘干至恒重的各

样方枯落物中分别取出部分枯落物称重,然后装入网袋后分别浸入水中 0.5,1,1.5,2,4,6,8,12,16,20,24 h 后,将网袋捞起并静置至不滴水时称量,由此测定枯落物样品在不同浸泡时长的持水量,计算各时间段的吸水速率,并计算枯落物的最大持水量、最大持水率、最大拦蓄率和有效拦蓄率。其计算公式为<sup>[10-12]</sup>:

枯落物持水量=枯落物鲜重-枯落物干重

枯落物持水率=枯落物持水量/枯落物干重×100%

枯落物吸水速率=枯落物持水量/吸水时间

$$R_0 = (G_0 - G_d) / G_0 \times 100\%$$

$$Rh_{\max} = (G_{24} - G_d) / G_d \times 100\%$$

$$R_{s_{\max}} = Rh_{\max} - R_0$$

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

$$Wh_{\max} = G_{24} - G_d$$

$$Ws_{\max} = R_{s_{\max}} \times G_d$$

$$W_{sv} = R_{sv} \times G_d$$

式中: $R_0$ 、 $Rh_{\max}$ 、 $R_{s_{\max}}$ 、 $R_{sv}$ 分别为枯落物自然含水率、最大持水率、最大拦蓄率和有效拦蓄率(%); $G_0$ 、 $G_d$ 、 $G_{24}$ 分别为枯落物自然状态下的质量、烘干状态的质量和浸水 24 h 后的质量(g); $Wh_{\max}$ 、 $Ws_{\max}$ 、 $W_{sv}$ 分别为枯落物最大持水量、最大拦蓄量和有效拦蓄量(t/hm<sup>2</sup>)。

### 1.3 数据处理

利用 SPSS 13.0 和 Excel 2007 软件对数据进行相关性分析和回归方程的显著性检验,采用 Sigma Plot 10.0 软件作图。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同灌丛林枯落物层厚度与蓄积量

由表 1 可以看出,白龙江上游不同灌丛类型枯落物厚度与蓄积量明显不同,5 种灌丛枯落物厚度大小依次为荚蒾>中华柳>甘肃柳>箭竹>绣线菊,厚度差在 0~3.3 cm 之间。枯落物总蓄积量大小依次为箭竹>甘肃柳>荚蒾>中华柳>绣线菊,箭竹枯落物蓄积量最大为 24.39 t/hm<sup>2</sup>,绣线菊总蓄积量最小,为 4.73 t/hm<sup>2</sup>,两者相差 19.66 t/hm<sup>2</sup>。

从枯落物的组成来看,不同灌丛类型枯落物各层次蓄积量所占比例有所不同,箭竹林未分解层占总蓄积量的比例最大,为 40.26%,荚蒾的最小,为 23.91%;5 种灌丛类型中,未分解层蓄积量所占比例均明显低于半分解层。

### 2.2 不同灌丛林枯落物的持水与蓄水能力

由表 2 可知,5 种灌丛类型的自然含水量大小为箭竹>中华柳>甘肃柳>荚蒾>绣线菊,箭竹自然含水量最高,为 52.16 t/hm<sup>2</sup>,绣线菊为 13.50 t/hm<sup>2</sup>,两者相差 38.66 t/hm<sup>2</sup>;枯落物自然含水量均表现为半分解层大于未分解层,分析其原因可能是一方面蒸发导致,一方面

是半分解层被未分解层覆盖所致。5 种灌丛类型枯落物未分解层最大持水率为 371.49%~483.28%，平均为 434.22%；半分解层枯落物最大持水率为 345.74%~401.34%，平均为 368.56%。不同灌丛类型枯落物半分解层的持水量均高于未分解层，中华柳未分解层持水量最高，箭竹半分解层持水量最高，绣线菊未分解层和半分解层持水量都是最小。整个枯落层最大持水量大小为中华柳>箭竹>荚蒾>甘肃柳>绣线菊。以上分析表明，箭竹和中华柳的持水能力同比之下是比较强的，而绣线菊是最弱的。

表 1 不同灌丛类型枯落物厚度与蓄积量

灌丛类型	海拔/m	枯落物厚度/cm		枯落物总厚度/cm	蓄积量/(t·hm <sup>-2</sup> )		总蓄积量/(t·hm <sup>-2</sup> )	蓄积量比例/%	
		未分解层	半分解层		未分解层	半分解层		未分解层	半分解层
荚蒾	2250	2.1	3.2	5.3	4.49	14.29	18.78	23.91	76.09
甘肃柳	2586	1.5	2.5	4.0	5.16	14.58	19.74	26.14	73.86
绣线菊	2750	1.5	1.0	2.5	1.37	3.36	4.73	28.96	71.04
箭竹	3000	1.0	3.0	4.0	9.82	14.57	24.39	40.26	59.74
中华柳	3007	2.0	2.5	4.5	5.45	10.38	15.83	34.43	65.57

表 2 不同灌丛类型枯落物持水能力

灌丛类型	枯落物层	自然含水量/(t·hm <sup>-2</sup> )	最大持水/%	最大持水量/(t·hm <sup>-2</sup> )	最大拦蓄/%	最大拦蓄量/(t·hm <sup>-2</sup> )	有效拦蓄率/%	有效拦蓄量/(t·hm <sup>-2</sup> )
荚蒾	未分解层	8.25	451.03	17.67	340.22	13.33	272.57	10.68
	半分解层	21.40	345.74	22.60	221.73	14.49	169.87	10.98
甘肃柳	未分解层	6.18	406.82	12.02	330.67	9.77	269.65	7.97
	半分解层	26.76	357.98	23.24	205.42	13.33	151.72	9.58
绣线菊	未分解层	4.13	483.28	5.47	387.83	4.39	315.34	3.48
	半分解层	9.37	401.34	9.73	253.07	6.13	192.87	4.23
中华柳	未分解层	10.48	375.49	22.05	246.82	14.65	191.10	11.34
	半分解层	26.83	372.92	22.99	171.77	10.59	115.83	7.10
箭竹	未分解层	12.25	458.47	15.87	362.67	12.55	293.90	10.17
	半分解层	39.91	364.81	27.07	137.14	10.18	82.42	6.12

### 2.3 不同灌丛林枯落物的持水量

由图 1 可知,5 种灌丛类型的枯落物未分解层和半分解层持水量随时间的变化趋势基本相似。枯落物在浸泡初期,其未分解层、半分解层持水量均迅速增加,除了箭竹的其他 4 种灌丛是在 2 h 以内吸水最快,而箭竹是在 6 h 以内吸水最快。随着浸水时间的增加,持水量增加的幅度减缓。5 种灌丛类型的枯落物在浸水 12 h 时,其持水量基本达到最大值,继续增

整个枯落物层的最大拦蓄量大小为荚蒾>中华柳>甘肃柳>箭竹>绣线菊,这与最大持水量变化规律有所不同。最大拦蓄量还不能完全反映枯落物层对实际降水的拦蓄情况,因此需要有效拦蓄量来反映。整个枯落物层的有效拦蓄量大小为荚蒾>中华柳>甘肃柳>箭竹>绣线菊,这与最大拦蓄量变化规律一致。

在 5 种典型灌丛类型中,中华柳不论是枯落物厚度、最大持水量、还是最大拦蓄量、有效拦蓄量都是比较的,枯落物的持水能力强,因此在白龙江上游保持水土和涵养水源过程中发挥重要的作用。

加浸水时间,其持水量变化幅度很小,直至浸水 22 h 达到最大持水量。但是,5 种灌丛类型枯落层的持水动态略有不同,箭竹和荚蒾、未分解层持水量在相同时间下均明显高于甘肃柳和绣线菊;而半分解层持水量是以中华柳最高,绣线菊最低。总体来说,不管是未分解层还是半分解层,这 5 种灌丛林地枯落物的持水作用是集中在降雨开始的 2 h 以内,尤其是在前 1 h 以内最为显著。

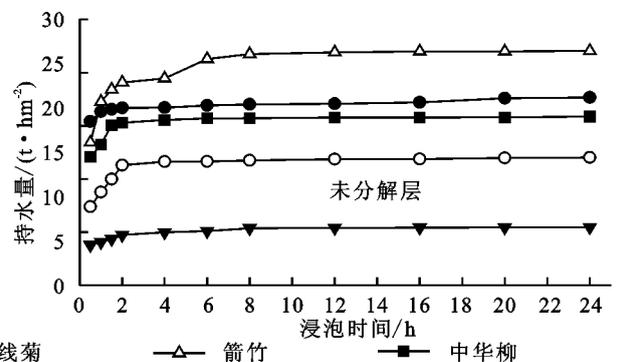
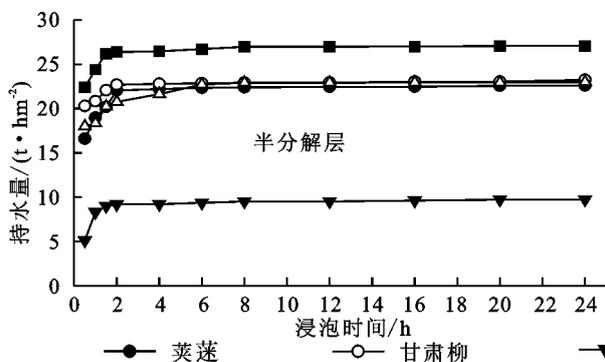


图 1 不同灌丛类型枯落物持水量与浸泡时间的关系

对不同灌丛类型枯落物持水量与浸泡时间进行数据拟合发现,枯落物持水量与浸泡时间之间的关系为: $y=a\ln(t)+b$ 。式中: $y$ 为枯落物持水量; $t$ 为浸水时间; $a$ 为方程回归系数; $b$ 为方程常数项。由拟合结果得到不同灌丛类型枯落物未分解层及半分解层持水量与浸泡时间的回归方程(表 3), $R^2$ 基本在 0.9 以上,说明枯落物持水量与浸水时间有较好的相关性。

## 2.4 不同灌丛林枯落物的吸水速率

由图 2 可知,不同灌丛类型枯落物的未分解层、半分解层的吸水速率随时间变化的趋势是相似的,在最初的 0.5 h 内,枯落物的吸水速率是最大的;浸水 2 h 内,吸水速率随时间急剧下降,但总体来说吸水速率还是较大;随着时间的推移,枯落物持水量的增加,吸水速率逐渐变缓;浸水 20 h 后,吸水速率逐渐接近零。由图 2 还可以看出,5 种灌丛类型的枯落物浸入水中的开始阶段其吸水速率相差较大,但随着时间的

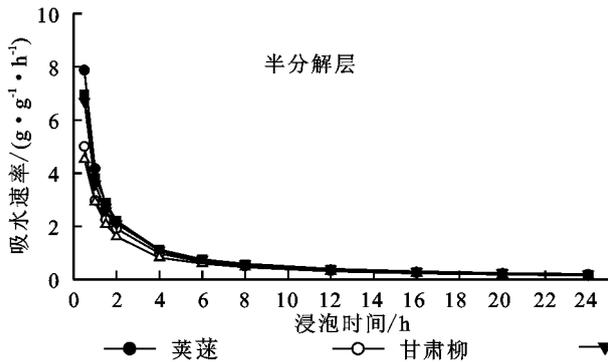


图 2 枯落物吸水速率与浸水时间的关系

对不同灌丛类型枯落物未分解层、半分解层的吸水速率与浸水时间数据拟合发现, $R^2$ 均在 0.9 以上,且均达到极显著水平( $p<0.01$ )(表 4),枯落物吸水速率( $V$ )与浸水时间( $t$ )之间的关系为  $V=kt^n$ 。式中: $k$ 为方程回归系数; $n$ 为指数。

表 4 不同灌丛类型枯落物吸水速率与浸水时间的回归方程

枯落物层	灌丛类型	关系式	$R^2$
未分解层	菉苳	$V=4.1202t^{-0.97542}$	0.99983**
	甘肃柳	$V=3.1021t^{-0.89516}$	0.99535**
	绣线菊	$V=3.7178t^{-0.90439}$	0.99912**
	中华柳	$V=2.8113t^{-0.89352}$	0.99675**
	箭竹	$V=3.9739t^{-0.94371}$	0.99827**
半分解层	菉苳	$V=2.9514t^{-0.94025}$	0.99774**
	甘肃柳	$V=3.2915t^{-0.96942}$	0.99967**
	绣线菊	$V=3.0825t^{-0.89236}$	0.98848**
	中华柳	$V=3.1194t^{-0.92961}$	0.9995**
	箭竹	$V=3.3204t^{-0.96478}$	0.99926**

## 3 讨论与结论

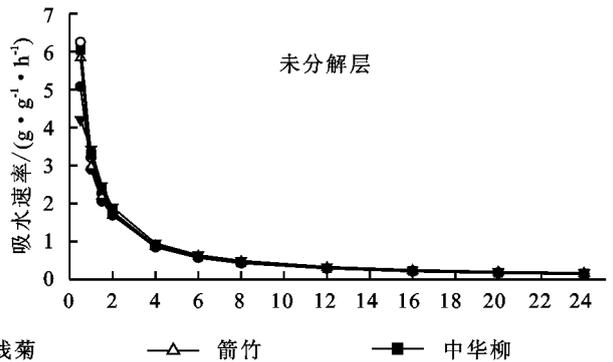
研究表明,植物群落生产力显著影响枯落物的蓄积量,同时气候、土壤肥力、土壤含水量和群落物种组成也影响枯落物的蓄积量<sup>[13]</sup>,不同的立地条件、不同灌丛类型之间枯落物蓄积量差异很大。本研究

增加,吸水速率相差缩小。在枯落物浸水 20 h 内,甘肃柳和中华柳枯落物半分解层的吸水速率高于未分解层,而其他 3 种灌丛类型枯落物半分解层的吸水速率低于未分解层。

表 3 不同灌丛类型枯落物持水量与浸水时间的回归方程

枯落物层	灌丛类型	关系式	$R^2$
未分解层	菉苳	$y=0.8113\ln(t)+15.542$	0.94129**
	甘肃柳	$y=1.9956\ln(t)+7.7523$	0.92073**
	绣线菊	$y=1.5747\ln(t)+6.4265$	0.96819**
	中华柳	$y=2.478\ln(t)+17.543$	0.96136**
	箭竹	$y=1.8326\ln(t)+23.236$	0.86668*
半分解层	菉苳	$y=2.4854\ln(t)+17.388$	0.89432*
	甘肃柳	$y=1.2501\ln(t)+20.43$	0.90739**
	绣线菊	$y=1.5747\ln(t)+6.4265$	0.77732*
	中华柳	$y=2.478\ln(t)+17.543$	0.93502**
	箭竹	$y=1.8326\ln(t)+23.236$	0.87465*

注: \*\*表示  $p<0.001$ ; \*表示  $p<0.01$ 。下同。



发现,白龙江上游 5 种典型灌丛枯落物的蓄积量介于 4.73~24.39 t/hm<sup>2</sup> 之间,箭竹林最大,绣线菊林最小,这与李红云等<sup>[4]</sup>对山东省石灰岩山区灌木林枯落物持水性能的研究结果相似,究其原因,可能是由于箭竹林的郁闭度过大,林冠遮挡了大部分光照,导致大量下层枝条和林下草本植物因缺少光照而死亡,并且分解缓慢,因此,枯落物的蓄积量较大。而绣线菊林没有过大的郁闭度,枯枝落叶生产的少,因此,其林内枯落物的蓄积量也较小。

枯落物的持水能力由林下枯落物的蓄积量和枯落物的持水特性两者共同决定,最大持水量是反映枯落物持水性能的一个重要指标,它是枯落物最大持水率和枯落物单位面积蓄积量之积,一般认为,枯落物浸泡 24 h 后的持水率为最大持水率<sup>[14]</sup>;本研究发现,半分解层的持水量均高于未分解层,这与张学龙等<sup>[15]</sup>的研究结果相一致。这是由于半分解层枯落物蓄积量较大所致。在 5 种典型灌丛类型中,枯落物持水量差别较大,箭竹和中华柳较大,分别为 42.94 t/hm<sup>2</sup> 和 45.04 t/hm<sup>2</sup>,绣线菊最小,为 15.2 t/hm<sup>2</sup>,这是枯落物厚度和蓄积量不同造成的。5 种典型灌丛类型的

枯落物持水量与浸水时间存在  $y = a \ln(t) + b$  关系,这与张学龙等<sup>[15]</sup>及李红云等<sup>[4]</sup>的研究结果相似。

森林枯落物的吸水速率与持水能力紧密相关。吸水速率越大,林内降水涵蓄的速度就越快,从而可以更好地减少地表径流的发生<sup>[16]</sup>,本研究中从整个吸水过程来看,在最初的2 h内各灌丛枯落物吸水速率迅速下降,浸水2 h后吸水速率明显减缓,随着浸泡时间延长,5种灌丛类型枯落物的吸水速率基本上趋向一致,究其原因是因为随着浸水时间的增加,枯落物都接近其最大持水量,也就是枯落物吸水趋于饱和,其增长速度随之减缓。在枯落物浸水20 h内,甘肃柳和中华柳枯落物半分解层的吸水速率高于未分解层,而其他3种灌丛类型枯落物半分解层的吸水速率低于未分解层。这与张学龙等<sup>[5]</sup>的研究有所不同,这可能是由于甘肃柳和中华柳灌丛枯落物半分解层的结构疏松,空隙较大,吸水能力强;而其他3种灌丛枯落物在取样时发现半分解层和腐殖质没有明显的分界线,枯落物半分解层由轻微的腐化,导致其吸水能力较低,而不同灌丛类型枯落物的蓄积量和吸水特性、以及灌丛生长的海拔不同也是导致其发生的原因。5种典型灌丛类型枯落物吸水速率与浸水时间存在  $V = kt^n$  关系。这与魏强等<sup>[17]</sup>及韩路等<sup>[18]</sup>对森林类型的研究结果相似。

最大拦蓄量反映的是扣除枯落层本身含水量占有的持水容量以外的枯落物层持水能力大小,代表最大可能的降雨截留量<sup>[19]</sup>,本研究中5种典型灌丛类型枯落物最大拦蓄量大小为莢蒾>中华柳>甘肃柳>箭竹>绣线菊,有效拦蓄量大小为莢蒾>中华柳>甘肃柳>箭竹>绣线菊,这可能是由于不同树种在枯落物自身吸水能力,单位面积枯落物蓄积量及自然含水率的差异所致。这表明莢蒾和中华柳的拦截降雨、蓄水能力强于其他3种灌丛,而绣线菊的最弱。

灌丛枯落物层是白龙江上游森林植被发挥水土保持和涵养水源的重要组成部分,由于各种原因导致枯落物特性的不同,进而致使水文生态功能的不同。在白龙江上游森林植被保护中,要特别注意利用典型灌丛的枯落物持水特性,采取有效措施,增加枯落物的持水能力。

本文仅对5种灌丛基于持水性能在样地尺度进行了研究,没考虑区域尺度。在以后的研究中,应加强灌丛在白龙江流域的持水性能研究,把样地尺度研究结果应用到整个白龙江流域,以此来更为准确的分析灌丛的持水性能,指导白龙江林区灌丛的建设。

#### 参考文献:

[1] 郭正刚,刘慧霞,孙学刚,等.白龙江上游地区森林植物

群落物种多样性的研究[J].植物生态学报,2003,27(3):388-395.

[2] 邱祖青,杨永宏,曹秀文,等.白龙江干旱河谷木本植物多样性及其区系地理特征[J].甘肃农业大学学报,2007,42(5):119-125.

[3] 刘贤德,张学龙,赵维俊,等.祁连山西水林区亚高山灌丛水文功能的综合评价[J].干旱区地理,2016,39(1):86-92.

[4] 李红云,杨吉华,鲍玉海,等.山东省石灰岩山区灌木林枯落物持水性能的研究[J].水土保持学报,2005,19(1):44-48.

[5] 常雅军,曹靖,马建伟,等.秦岭西部山地针叶林凋落物持水特性[J].应用生态学报,2008,19(11):2346-2351.

[6] 陈国鹏,曹秀文,王会儒,等.白龙江干旱河谷岩生植物持水性能[J].水土保持学报,2014,28(1):102-105.

[7] 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):90-98.

[8] 王志泰.东祁连山高寒草原柳灌丛—草地群落结构研究[J].草业科学,2004,21(11):1-6.

[9] 倪自银,汪有奎,杨全生,等.祁连山自然保护区灌木林演灾害及防治对策[J].水土保持研究,2005,12(2):107-110.

[10] 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.

[11] 赵磊,王兵,蔡体久,等.江西大岗山不同密度杉木林枯落物持水与土壤贮水能力研究[J].水土保持学报,2013,27(1):203-208,246.

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

[13] Pausas, Juli G. Litter fall and litter decomposition in *Pinus sylvestris* forests of the eastern Pyrenees[J]. Journal of Vegetation Science, 1997, 8(5): 643-650.

[14] 雷瑞德.秦岭火地塘林区华山松林水源涵养功能的研究[J].西北林学院学报,1984(1):19-33.

[15] 张学龙,金铭,刘贤德,等.祁连山5种典型灌木林枯落物蓄积量及其持水特性[J].生态环境学报,2015,24(5):735-740.

[16] 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.

[17] 魏强,凌雷,张广忠,等.甘肃兴隆山主要森林类型凋落物累积量及持水特性[J].应用生态学报,2011,22(10):2589-2598.

[18] 韩路,王海珍,吕瑞桓,等.塔里木河上游不同森林类型枯落物的持水特性[J].水土保持学报,2014,28(1):96-101.

[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.