

祁连山林草复合流域灌木林水文生态功能研究

张平¹, 刘贤德², 张学龙², 赵维俊², 敬文茂², 王顺利²

(1 甘肃农业大学农学院, 甘肃 兰州 730070; 2 甘肃省祁连山水源涵养林研究院, 甘肃 张掖 734000)

摘要: 对祁连山林草复合流域5种主要灌木林的水文生态功能进行了研究。结果表明:(1)5种灌木林林冠平均截留率的大小范围为6.98%~22.45%;(2)5种灌木枯落物的最大持水率均为自身重量的1.6~4.0倍, 枯落物最大持水量和有效持水量分别为23.83~134.95 t/hm²和17.25~83.62 t/hm²;(3)土壤的最大持水量及有效持水量都随土壤深度的增加而不断下降, 与土壤的总孔隙度和非毛管孔隙度的变化规律相一致;土壤的最大持水量和有效持水量分别为3 090.96~4 460.82 t/hm²和680.68~1 328.82 t/hm²;(4)各灌木林地土壤表层的稳渗率变化范围为8.88~141.67 mm/min, 前30 min累计入渗量的变化幅度为338.25~4 718.34 mm;(5)5种灌木林地总蓄水量大小经综合评价依次为: 吉拉柳灌丛>鲜黄小檗灌丛>箭叶锦鸡儿灌丛>金露梅灌丛>甘青锦鸡儿灌丛。

关键词: 祁连山; 复合流域; 灌木林; 水文生态功能

中图分类号: S715.7

文献标识码: A

文章编号: 1000-6060(2013)05-0922-08(922~929)

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 and 替代能源方面起着非常重要的作用。祁连山山地森林生态圈主要是由青海云杉林、祁连圆柏林、高山灌丛林和中低山阳性灌木林等4个森林生态系统所组成。不同森林类型, 由于植物生物学特性及其林分结构的不同, 其水文生态功能有所差异。据有关研究报道^[1-2], 森林涵养水源能力表现为林冠截持降水量、枯落物持水量、林地土壤蓄水量三者之和, 在外界环境条件一致的情况下, 森林的结构及其动态变化对这一功能的大小具有决定性的作用^[3]。

近年来, 我国西北地区生态形势日趋严峻, 灌木林的价值日益凸显, 大力发展灌木林, 充分发挥灌木林在生态建设、生态安全、生态文明中的突出优势, 已成为社会经济发展的迫切需要。灌木林是祁连山森林植被类型的重要组成部分, 其分布面积占整个森林面积的68%, 作为重要水源涵养林区的

祁连山山地, 灌木林在维系区域水量平衡中起着重要作用, 然而关于灌木林的研究特别是灌木林水文生态功能研究的资料甚少^[4-8]。基于这样的背景, 从生态学的观点出发, 选择祁连山林草复合流域对其5种主要灌木植被类型进行研究, 通过野外调查、连续监测和室内样品分析, 揭示不同灌木类型生态水文功能特点, 加深我们对祁连山山地灌木林生态水文功能的认识, 为祁连山森林生态系统的管理提供必要理论支持。

1 研究区概况

祁连山地处青藏、黄土两大高原和蒙新荒漠的交汇处(93°20'~103°E, 36°30'~39°30'N), 属高寒干旱半干旱气候, 区内自然条件复杂, 水热条件差异大, 形成了多种具有明显垂直梯度和水平差异的植被类型和土壤类型。祁连山一般海拔3 000~5 000 m, 2 600 m以下为中低山荒漠带; 海拔2 600~3 000 m的中山区, 水热条件适宜乔灌木林生长, 主

收稿日期: 2012-12-17; 修订日期: 2013-02-11

基金项目: 国家自然科学基金项目(91125012)资助

作者简介: 张平(1963-), 男, 甘肃敦煌人, 硕士, 甘肃农业大学在读博士, 主要从事农林牧生态研究

通讯作者: 刘贤德, 教授. Email: Liuxiade@163.com

要植被类型为森林草原;海拔3 200~3 700 m的亚高山区,主要植被类型为灌丛草原;3 700 m以上发育为多年冻土,4 400 m以上终年积雪,5 000 m以上多发育有现代冰川。

祁连山山地森林主要由青海云杉林(*Picea crassifolia*)、祁连圆柏林(*Sabina przewalskii*)、高山灌木林和中低山阳性灌木林组成。灌木林分布面积约有 $41.26 \times 10^4 \text{ hm}^2$,面积大,分布广,占祁连山区林业用地面积的约68%^[8]。因此,灌木林是祁连山森林的重要组成部分。湿性灌木林主要分布在海拔3 300~4 000 m的亚高山区的阴坡和半阴坡^[9];阳坡和半阴坡以及沟谷地区、海拔2 600 m左右的中低山荒漠带分布有大面积的阳性灌木林。

试验区设在祁连山中段的西水林区保护站(92°20'~103°10'E,36°30'~39°30'N),属大陆性高寒半湿润山地森林草原气候^[10],该区年平均气温-0.6~2.0℃,极端最高气温28.0℃,极端最低气温-36.0℃,≥10.0℃积温200~1 130℃,7月平均气温10.0~14.0℃;年降水300~600 mm,其中60%以上集中在6~9月,相对湿度50%~70%,年蒸发量1 200 mm左右,无霜期90~120 d,年均日照时数2 130 h左右。试验区土壤和植被随山地地形和气候的差异而形成明显的垂直分布带,土壤主要类型为山地森林灰褐土、山地栗钙土以及亚高山灌丛草甸土3个类型,总的特征是土层薄、质地粗,以粉沙块为主;成土母质主要是泥炭岩、砾岩、紫红色沙页岩等;有机质含量中等,pH值7.0~8.0。试验区森林类型单一,主要是以青海云杉林为主的寒温性针叶林与草地成犬牙状交错,条块状分布在阴坡、半阴坡;阳坡以草地为主,零星分布祁连圆柏和灌木,灌木林类型主要为箭叶锦鸡儿、吉拉柳、金露梅、鲜黄小檗和甘青锦鸡儿^[11]。

2 研究方法

2.1 样地选择与设置

2012年6~7月,在多方踏查的基础上,选择具有代表性的箭叶锦鸡儿、吉拉柳、金露梅、鲜黄小檗、甘青锦鸡儿5种灌丛林,分别设置20 m×20 m的标准样地,各样地基本情况见表1。

2.2 测定方法

(1) 林地降水量与穿透水量测定:测定时间为2011年10月~2012年10月,林地降水量用雨量器测定,由于各林地降水量的观测都在山地进行,受山地地形和气流的影响,降水量(含降雪)会有一定的动力损失,为了减少损失和消除风的影响,在每个样地上都设置了与之对应的空旷地受风影响较小的降水观测点,并在雨量器受风口上安装遮风装置;穿透水量的测定是在每个灌木林样地内随机布设9个雨量器,由于灌木高的高度接近降水观测高度,把雨量器尽可能安放在较低的位置,这样可以取得较好的观测效果。影响灌木干流量的因素较多,比较难以准确测定,因为本研究未对其干流量进行测定。

在每次降水后即时测定空旷地雨量器和样地内雨量器的降水(穿透水量),然后准确计算林冠截留量 $f(i)$ (mm)、截留率 $f(ir)$ (%)等指标。

$$\begin{aligned} f(i) &= f(p) - f(t), \\ f(ir) &= f(i) / f(p) \times 100\%, \end{aligned} \quad (1)$$

式中: $f(i)$ 为林冠截留量(mm); $f(p)$ 为林外空旷地降水量(mm); $f(t)$ 为林内降水量(mm),包括穿透水和滴水量(mm); $f(ir)$ 为林冠截留率(%)。

(2) 枯落物存储量及持水量测定:在各灌木林样地内设置1 m×1 m的小样方5个,收集其中的枯

表1 不同灌木林植被类型标准地概况

Tab.1 Sample plots profile of different shrub vegetation types

林分类型	土层厚度/cm	土壤类型	海拔/m	坡度/°	坡向	生长状况	地径/cm	盖度/%	平均高/m
箭叶锦鸡儿灌丛	40	高山草甸土	3 400	35	EN	一般	20	52	0.50
吉拉柳灌丛	50	高山草甸土	3 400	32	EN	良好	26	55	1.40
金露梅灌丛	50	高山草甸土	3 400	33	E	好	16	56	0.90
鲜黄小檗灌丛	40	栗钙土	2 600	30	W	一般	20	52	1.80
甘青锦鸡儿灌丛	50	栗钙土	2 500	22	WS	一般	25	50	1.20

落物,包括未分解层、半分解层和全分解层。采用四分法取样称重 ($W_{1,g}$),置于烘箱中在 $85\text{ }^\circ\text{C}$ 下烘干至恒重后称重 ($W_{2,g}$),再将烘干后的枯落物装入纱布袋中置于水中浸泡 24 h,取出将其空干(以无水滴下为标准)后称重 ($W_{3,g}$),用以计算枯落物的自然持水率 ($W_r, \%$)、最大持水率 ($W_{rm}, \%$) 和有效持水率 ($W_s, \%$)^[12-14]

$$\begin{aligned} W_r &= (W_1 - W_2) / W_2 \times 100\% , \\ W_{rm} &= (W_3 - W_2) / W_2 \times 100\% , \\ W_s &= 0.85 \times W_{rm} - W_r . \end{aligned} \quad (2)$$

(3) 土壤物理性质及持水量测定:采用环刀法,于 5 月和 9 月在标准地附近按上、中、下部位选取 3 个土壤剖面,每个剖面分别按照土层深度 0 ~ 10 cm、10 ~ 20 cm、20 ~ 40 cm 以下分 3 层取样,每个组合重复 3 次,测定土壤含水量、容重、毛管孔隙度、非毛管孔隙度、田间持水量等土壤水分物理性质指标^[15]。

单位面积最大持水量(t/hm^2)的计算:

单位面积最大持水量 = $10\ 000\ \text{m}^2 \times$ 土壤总孔隙度% \times 土层厚度 $\text{m} \times$ 水比重 t/m^3 。

单位面积有效持水量(t/hm^2)的计算:

单位面积有效持水量 = $10\ 000\ \text{m}^2 \times$ 土壤非毛管孔隙度% \times 土层厚度 $\text{m} \times$ 水比重 t/m^3 。

(4) 土壤入渗速率的测定与计算:用渗透环(单环逐次定量加水)法测定水分入渗性能土壤渗透性的计算。

渗透速率(mm/min): $V = (10 \times Qi) / (S \times Ti)$, (3)

式中: V, Qi, Ti, S 分别为每次重复测定的渗透速率 (mm/min)、每次入渗水量 (ml)、入渗时间 (min)、渗透环断面面积 (cm^2)。

渗透系数(mm/min)的计算

$$K = V \times L / (L + H) , \quad (4)$$

式中: V 为渗透速度 (mm/min); L 是土层厚度; H 为水层厚度 (cm); K 为渗透系数 (mm/min)。

$$K_{10} = K / (0.7 + 0.3Ti) , \quad (5)$$

式中: K_{10} 为 $10\text{ }^\circ\text{C}$ 时的渗透系数 (mm/min)。

(5) 林地土壤总蓄水量的计算:依据林地枯落物饱和持水量和土壤最大持水量的大小来计算:

林地土壤总蓄水量 (t/hm^2) = 林地枯落物饱和持水量 (t/hm^2) + 林地土壤最大持水量 (t/hm^2)。

3 结果与分析

3.1 不同灌木林植被类型对降雨的分配

林内降雨是土壤水分的主要来源,它受降雨、降雨强度、降雨历时、林分类型等多种因素的影响。通过对 2011 年 10 月 ~ 2012 年 10 月 86 次观测数据进行整理,结果如表 2,从观测结果来看,各灌丛类型平均截留率为 6.98% ~ 22.45%,其中,鲜黄小檗灌丛林截留量(率)最大,其次为吉拉柳灌丛、箭叶锦鸡儿灌丛、金露梅灌丛和甘青锦鸡儿灌丛,平均截留率分别为 22.45%, 20.48%, 16.76%, 10.42% 和 6.98%。

在不同的降水形态下,不同林分类型的林冠截留率亦有差别,观测表明:固态降水(冰雹除外)在林冠上存留的要比液态降水多一些,因此林冠截留量(率)大于液态降水,不同林分类型在夏秋季节(5 ~ 10 月)林冠截留率为 6.88% ~ 21.82%,在冬春季节(11 ~ 4 月份)林冠截留率为 7.79% ~ 27.04%。5 种不同类型的灌木林林冠截留降雪(雪的)截留率比冠截

表 2 不同灌木林植被类型对降水的分配

Tab.2 Different shrub vegetation types to distribution the rainfall

林分类型	降水量 / mm (降雨量/降雪量)	林内		林冠		林冠截雨(夏秋)		林冠截雪(冬春)	
		降水量 / mm	透流率 / %	截留量 / mm	截留率 / %	截留量 / mm	截留率 / %	截留量 / mm	截留率 / %
箭叶锦鸡儿灌丛	410.6(328.5/82.1)	341.8	83.24	68.8	16.76	53.2	16.20	15.6	19.00
吉拉柳灌丛	410.6(328.5/82.1)	326.5	79.52	84.1	20.48	64.1	19.51	20.0	24.36
金露梅灌丛	410.6(328.5/82.1)	367.8	89.58	42.8	10.42	33.5	10.20	9.3	11.33
鲜黄小檗灌丛	326.5(287.3/39.20)	253.2	77.55	73.3	22.45	62.7	21.82	10.6	27.04
甘青锦鸡儿灌丛	308.2(277.7/30.8)	286.7	93.02	21.5	6.98	19.1	6.88	2.4	7.79

留降雨的截留率分别高出0.91%~5.22%。

3.2 不同灌丛类型枯落物持水性能分析

枯落物除了防止降雨对土壤表面的击溅,增加土壤有机质外,具有很大的吸水能力和透水性,对水源涵养起着一定的作用,因而枯落物持水量是评价植被水源涵养功能的一个重要指标,其吸持水分的能力与枯落物的性质和现存量有很大关系。由表2知,吉拉柳灌丛的现存量最大为35.44 t/hm²,鲜黄小檉灌丛次之为32.66 t/hm²,箭叶锦鸡儿灌丛、金露梅灌丛和甘青锦鸡儿灌丛分别为25.94 t/hm²、18.53 t/hm²和14.38 t/hm²。

枯落物有较强的吸水能力,从表3看出,在所研究的5种灌木林中,枯落物最大持水率为自身重量的1.6~4.0倍,最大持水量达到23.83~134.95 t/hm²,有效持水量的变化幅度在17.25~83.62 t/hm²之间。各灌木林枯落物持水性能综合比较结果依次为吉拉柳灌丛、箭叶锦鸡儿灌丛、鲜黄小檉灌丛、金露梅灌丛、甘青锦鸡儿灌丛。产生这种差异性的主要原因在于,吉拉柳灌丛由于其枯落物现存量最高,且最大持水量较高,因而导致其综合持水性能最强;甘青锦鸡儿灌丛,其综合持水性能最弱主要受其枯落物现存量低,而最大持水率也较低所致。

3.3 不同灌丛类型土壤水分物理性质与持水性能分析

林地土壤水分物理性质是林地土壤的基本特征,表现在森林土壤的疏松性、结构性、吸收性、持水性、透水性以及水分移动状况等方面。林地土壤的持水性能是评价森林水源涵养能力的主要指标之一,常以非毛管孔隙度计算一定厚度土壤的持水能力(t/hm²)作为其水源涵养能力评价的重要指标,非毛管孔隙度的增加对增强林地的水源涵养功能具有重要意义^[16-17]。测定结果表明,除干青锦鸡儿土壤容重大于1.0以外,其他4种灌木林地土壤容重值均小于1.0以下,其值范围为0.52~0.79 g/cm³,说明各灌木林土壤较疏松。就孔隙度来看,不同类型灌木林地总孔隙度变动在47.09%~68.18%之间。其中以吉拉柳灌丛和鲜黄小檉灌丛最大分别为68.18%和65.35%,箭叶锦鸡儿灌丛、金露梅灌丛和甘青锦鸡儿灌丛分别为60.98%、54.99%和47.09%。这是由于林地表面枯落物分解腐烂后,增加了腐殖质的含量,有利于表层土壤团粒结构的形成。不同灌木林地各土层毛管孔隙度均大于36.72%,从各

土层毛管孔隙度平均值的大小看,最大为鲜黄小檉灌丛和吉拉柳灌丛,其次为箭叶锦鸡儿灌丛、金露梅灌丛和甘青锦鸡儿灌丛。毛管孔隙度越大,土壤中有效水的贮存容量越大,可供树木根系利用的有效水分的比例增加。5种灌木林中吉拉柳灌木林和箭叶锦鸡儿灌木林的非毛管孔隙度最高,分别为20.31%和16.42%;鲜黄小檉灌木林的非毛管孔隙度处于中等水平,为14.80%;甘青锦鸡儿和金露梅灌木林的非毛管孔隙度较低,分别为10.37%和11.31%(表4)。非毛管孔隙度越大的林分,其土壤通透性越好,有利于降水的下渗,从而减少地表径流。

众多研究表明,森林土壤对于水分的涵蓄能力的高低主要取决于土壤厚度和土壤的有效持水量。从表5可以看出,5种灌木林地的单位面积最大持水量在2 354.50~3 409.00 t/hm²,其有效持水量在518.5~1 015.50 t/hm²,在排水能力方面它们之间的差距不是很大。5种灌木林土壤持水能力大小依次为吉拉柳灌丛、鲜黄小檉灌丛、金露梅灌丛、箭叶锦鸡儿灌丛、甘青锦鸡儿灌丛。

3.4 不同灌丛类型土壤渗透性能分析

土壤的渗透性能是土壤的重要水分物理性质之一,也是林分水源涵养功能的重要指标,它与土壤质地、结构、孔隙度(非毛管孔隙度)、有机质、土壤湿度有关^[18-19]。渗透性能良好的土壤,在一定的降雨强度条件下,水分可以充分地进入土壤贮存起来或转变为地下径流,不易形成地表径流,使林地水土流失得到有效控制以起到保持水土的作用。不同林分的土壤渗透性能存在一定差异(表6)。

从表6看出,不同灌丛类型表层土壤的初渗率和稳渗率均大于下层土壤,与其土壤的容重、孔隙度(非毛管孔隙度)垂直分布规律相一致。除了土壤质地外,自然含水率的大小对土壤的初渗速率也是有一定影响,自然含水率高就会降低它的初渗速度。从不同灌丛类型土壤表层(0~10 cm)水分入渗特征看,吉拉柳灌丛的稳渗率最高为141.67 mm/min,箭叶锦鸡儿灌丛、鲜黄小檉灌丛、金露梅灌丛、甘青锦鸡儿灌丛,依次为63.78 mm/min, 39.14 mm/min、27.00 mm/min和8.88 mm/min。通过观测数据分析,发现在土壤入渗开始的30 min入渗变化剧烈,而在30 min以后变化减少趋于平缓,因此,对前30 min的累积入渗量进行分析就有重大的意义。各灌木

表3 不同灌木林植被类型枯落物层的持水能力

Tab.3 Water-holding capacity of litter layer of different shrub vegetation types

林分类型	厚度 / cm	现存 / t·hm ⁻²	自然含水率 / %	最大持水率 / %	最大持水量 / t·hm ⁻²	有效持水率 / %	有效持水量 / t·hm ⁻²
箭叶锦鸡儿灌丛	2.0	25.94	73.26	402.80	104.49	269.12	69.81
吉拉柳灌丛	2.2	35.44	87.72	380.80	134.95	235.96	83.62
金露梅灌丛	2.4	18.53	42.42	263.84	48.89	181.84	33.69
鲜黄小檗灌丛	2.5	32.66	45.68	203.99	66.62	127.71	41.71
甘青锦鸡儿灌丛	1.8	14.38	20.85	165.69	23.83	119.99	17.25

表4 不同灌丛类型的土壤水分物理性质

Tab.4 Soil water physical property of different shrub vegetation types

林分类型	土层厚度 / cm	容重 / g·cm ⁻³	总孔隙度 / %	非毛管孔隙度 / %	毛管孔隙度 / %	毛管持水量 / %	非毛管含水率 / %	最大持水量 / %
箭叶锦鸡儿灌丛	40	0.78	60.98	16.42	44.65	62.38	25.26	82.23
吉拉柳灌丛	50	0.52	68.18	20.31	47.87	91.21	40.78	134.5
金露梅灌丛	50	0.79	54.99	11.31	43.58	52.24	15.70	68.57
鲜黄小檗灌丛	50	0.59	65.35	14.80	50.55	67.96	30.20	92.15
甘青锦鸡儿灌丛	50	1.08	47.09	10.37	36.72	36.19	11.52	47.98

表5 不同灌丛类型的土壤持水性能

Tab.5 Soil retention ability of different shrub vegetation types

林分类型	土层厚度 / cm	最大持水量 / t·hm ⁻²	有效持水量 / t·hm ⁻²	田间持水量 / %	排水能力 / t·hm ⁻²
箭叶锦鸡儿灌丛	40	2 439.20	656.80	54.39	723.84
吉拉柳灌丛	50	3 409.00	1 015.50	88.51	919.80
金露梅灌丛	50	2 749.50	565.50	56.71	786.96
鲜黄小檗灌丛	50	3 267.50	740.00	58.34	828.34
甘青锦鸡儿灌丛	50	2 354.50	518.50	31.96	720.90

表6 不同灌丛类型的土壤渗透性能

Tab.6 Soil permeability of different shrub vegetation types

林分类型	土层深度 / cm	自然含水率 / %	渗透速率 / mm·min ⁻¹		渗透系数 K ₁₀ / mm·min ⁻¹	前30 min 累计入渗量 / mm
			初渗	稳渗		
箭叶锦鸡儿灌丛	0~10	106.17	83.06	63.78	38.34	2 106.22
	10~20	87.96	42.42	26.88	17.86	992.88
	20~40	41.75	15.69	9.71	6.20	351.16
吉拉柳灌丛	0~10	153.35	200.02	141.67	96.01	4 718.34
	10~20	120.25	68.88	43.62	38.46	1 611.72
	20~40	104.36	64.11	27.76	19.42	1 196.34
金露梅灌丛	0~10	65.55	52.43	27.00	22.48	1 038.88
	10~20	53.98	34.68	14.79	12.06	681.68
	20~40	63.95	25.70	9.25	6.68	426.06
鲜黄小檗灌丛	0~10	28.40	62.52	39.14	32.46	1 454.76
	10~20	22.19	42.00	27.00	22.86	945.26
	20~40	21.11	38.77	24.00	16.78	862.72
甘青锦鸡儿灌丛	0~10	22.45	13.67	8.88	7.88	338.25
	10~20	14.95	11.43	5.03	5.21	227.78
	20~40	13.74	9.95	4.37	4.42	197.96

林上层土壤(0~10 cm)的前30 min累积入渗量仍以吉拉柳灌丛最高达到4 718.34 mm,5种灌木林土壤渗透能力综合比较从大到小依次为吉拉柳灌丛、箭叶锦鸡儿灌丛、鲜黄小檗灌丛、金露梅灌丛和甘青锦鸡儿灌丛。

3.5 不同植被类型林地总蓄水量评价

综合分析表3、4、5,依据林地总蓄水量(枯落物饱和持水量+土壤最大持水量)的大小,来评价5种不同灌丛植被类型水源涵养功能(表7)。吉拉柳灌丛总蓄水量最大,可达4 595.77 t/hm²,鲜黄小檗灌次之为3 541.43 t/hm²,箭叶锦鸡儿灌丛和金露梅灌丛较接近分别为3 401.39 t/hm²、3 274.22 t/hm²,甘青锦鸡儿灌丛最差为3 114.79 t/hm²。土壤贮水量占总蓄水量的92%以上,水源涵养功能以土壤层为主。

表7 不同灌丛类型林地总蓄水量

Tab.7 Total storage water capacity of different shrub vegetation types

林分类型	枯落物饱和持水量 / t·hm ⁻²	土壤最大持水量 / t·hm ⁻²	林地土壤总蓄水量 / t·hm ⁻²
箭叶锦鸡儿灌丛	104.49	2 439.20	2 543.69
吉拉柳灌丛	134.95	3 409.00	3 543.95
金露梅灌丛	48.89	2 749.50	2 788.39
鲜黄小檗灌丛	66.62	3 267.50	3 334.12
甘青锦鸡儿灌丛	23.83	2 354.50	2 378.33

4 讨论与结论

通过对祁连山林草复合流域不同灌木林林冠截留、枯落物持水性能和土壤水分物理性质及持水能力的研究表明,灌木林具有较强的水文生态功能。

(1)在整个降雨季内5种灌木林林冠平均截留率从大到小依次为鲜黄小檗灌丛22.45%、吉拉柳灌丛20.48%、箭叶锦鸡儿灌丛16.76%、金露梅灌丛10.42%和甘青锦鸡儿灌丛6.98%。5种不同类型的灌木林林冠截留降雪的截留率比冠截留降雨的截留率高出0.91%~5.22%。

(2)受枯落物现存量及其自然含水率差异的影响,所研究的5种类型灌木林枯落物层的最大持水量在23.83~134.95 t/hm²,有效持水量在17.25~83.62 t/hm²,持水能力大小依次为吉拉柳灌丛、箭叶锦鸡儿灌丛、鲜黄小檗灌丛、金露梅灌丛、甘青锦鸡

儿灌丛。造成这种差异的是吉拉柳灌丛和箭叶锦鸡儿灌丛生物量大^[20],加之地处高海拔地区,低温高湿环境使得对应的枯落物经过长时间积累较其他灌丛类型生物量大。金露梅灌丛虽地处高海拔,但其生物量较小,持水量较小。鲜黄小檗灌丛和甘青锦鸡儿灌丛从地处低海拔,林地土壤较为干燥,为干性灌木性,枯落物凋落量较小,单位面积持水量也较小^[21]。

(3)受枯落物现存量及其自然含水率差异的影响^[22-23],灌木林地土壤的单位面积有效持水量变化范围为518.50~1 015.50 t/hm²,有效持水量以吉拉柳灌丛最强,其次分别为箭叶锦鸡儿灌丛、鲜黄小檗灌丛、金露梅灌丛、甘青锦鸡儿灌丛。

(4)不同灌木林分土壤表层的稳渗速率以吉拉柳灌丛最高,其次分别为箭叶锦鸡儿灌丛、鲜黄小檗灌丛、金露梅灌丛和甘青锦鸡儿灌丛,变化范围为8.88~141.67 mm/min;前30 min累积入渗量仍以吉拉柳灌丛最高,其次分别为箭叶锦鸡儿灌丛、鲜黄小檗灌丛、金露梅灌丛和甘青锦鸡儿灌丛,变化范围为338.25~4 718.34 mm/min。其变化规律枯落物层持水量变化大小一致,表明二者之间为显著相关,主要是因为丰富的枯落物为土壤提供了丰富的团聚体,即土壤有机质。

(5)根据对以上几种灌木林地的枯落物持水性能、土壤容重、非毛管孔隙度、饱和含水量、有效含水量以及入渗性能等各项指标的测定,对它们进行综合分析得出:5种灌木林的持水能力顺序为吉拉柳灌丛>鲜黄小檗灌丛>箭叶锦鸡儿灌丛>金露梅灌丛>甘青锦鸡儿灌丛。

综上所述,灌木林是祁连山森林生态系统的重要组成部分,开展灌木林水文生态研究有助于我们加强对祁连山山地森林生态水文的认识。研究结果表明,灌木林在林冠截留、枯落物与土壤持水性能和土壤入渗性能等各项指标远大于草地而与祁连山青海云杉林接近^[24],如鲜黄小檗灌丛林冠截留率为22.45%,占到青海云杉林林冠截留率(35.28%)的63.6%^[25];吉拉柳灌丛和箭叶锦鸡儿灌丛枯落物层最大持水量分别为134.95 t/hm²和104.49 t/hm²,与青海云杉林(167.79 t/hm²)比较接近;再如吉拉柳灌丛和鲜黄小檗灌丛土壤层的最大持水量分别为3 409.00 t/hm²和3 267.50 t/hm²,已超过和接近青海云杉林的3 628.50 t/hm²;而从不同

灌丛类型土壤表层水分入渗特征比较来看,吉拉柳灌丛表层的稳渗率最高为141.67 mm/min,已超过青海云杉林(126.53 mm/min)^[26]。由此说明,灌木林在祁连山区森林生态系统中有着独特的价值和作用,具有祁连山建群种青海云杉林不可替代的生态水文功能。因此,加强祁连山灌木林的保护和建设,重视发展灌木林,是祁连山生态保护恢复和发展的重要对策。

参考文献 (References)

- [1] 陈东立,余新晓,廖邦洪,等. 中国森林生态系统水源涵养功能分析[J]. 世界林业研究, 2005, 18(1): 49-54. [CHEN Dongli, YU Xinxiao, LIAO Banghong, et al. Analysis on the function of conservation water of the Chinese forest ecosystem [J]. World Forestry Research, 2005, 18(1): 49-54.]
- [2] 张志永,张卓文,陈玉生,等. 5种主要森林类型涵养水源能力比较研究[J]. 福建林学院学报, 2008, 25(2): 171-175. [ZHANG Zhiyong, ZHANG Zhuowen, CHEN Yusheng, et al. A comparative study on water conservation capacity of five main forest types [J]. Journal of Fujian College of Forestry, 2008, 25(2): 171-175.]
- [3] 马雪华,杨茂瑞,胡星翔. 亚热带杉木、马尾松人工林水文功能的研究[J]. 林业科学, 1993, 29(3): 199-206. [MA Xuehua, YANG Maorui, HU Xingbi. A study on hydrological function of subtropical plantations of *Cunninghamia lanceolata* and *Pinus massoniana* [J]. Scientia Silvae Sinicae, 1993, 29(3): 199-206.]
- [4] 孟好军,刘贤德,董晓莉,等. 祁连山干旱山地饲料灌木林营造技术研究[J]. 甘肃林业科技, 2002, 27(1): 51-53. [MENG Haojun, LIU Xiande, DONG Xiaoli, et al. Study on planting techniques of forage shrub forest in Qilian Mountain arid land [J]. Journal of Gansu Forest Science and Technology, 2002, 27(1): 51-53.]
- [5] 高松. 祁连山区灌木造林技术研究[J]. 甘肃林业科技, 2006, 31(3): 36-39. [GAO Song. Study on shrub forestation techniques of Qilian mountainous area [J]. Scientific Technology of Forestry in Gansu Province, 2006, 31(3): 36-39.]
- [6] 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. [WANG Zhitai. Studies on community structure of *Salix* shrub in alpine grassland of east Qilian Mountain [J]. The Grass Science, 2004, 21(11): 1-6.]
- [7] 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. [NI Ziyin, WANG Youkui, YANG Quansheng, et al. Control countermeasure on disaster of shrubbery in the Nature Reserve of Qilian Mountain [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2005, 12(2): 107-110.]
- [8] 王学福. 灌木林在祁连山区的作用及发展对策研究[J]. 甘肃林业科技, 2005, 30(2): 32-35. [WANG Xuefu. The importance of shrub in Qilian Mountain and its protection and development countermeasures [J]. Journal of Gansu Forestry Science and Technology, 2005, 30(2): 32-35.]
- [9] 刘贤德,牛赞,敬文茂,等. 祁连山森林内外主要气象因子对比研究[J]. 干旱区地理, 2009, 32(1): 32-36. [LIU Xiande, NIU Yun, JING Wenmao, et al. Comparison of principal meteorology factors inside & outside forest in Qilian Mountains [J]. Arid Land Geography, 2009, 32(1): 32-36.]
- [10] 刘兴明,刘贤德,车宗玺,等. 祁连山青海云杉林区苔藓层对流域水文的影响[J]. 干旱区地理, 2010, 33(6): 962-966. [LIU Xingming, LIU Xiande, CHE Zongxi, et al. Eco-hydrological functions of the moss layer in *Picea crassifolia* forest of Qilian Mountains [J]. Arid Land Geography, 2010, 33(6): 962-966.]
- [11] 彭焕华,赵传燕,沈卫华,等. 祁连山北坡青海云杉林冠对降雨截留空间模拟—以排露沟流域为例[J]. 干旱区地理, 2010, 33(4): 110-116. [PENG Huanhua, ZHAO Chuanyan, SHEN Weihua, et al. Modeling rainfall canopy interception of *Picea crassifolia* forest in northern slope of Qilian Mountains case of Pailugou catchment [J]. Arid Land Geography, 2010, 33(4): 110-116.]
- [12] 李红云,杨吉华. 济南市南部山区森林涵养水源功能的价值评价[J]. 水土保持学报, 2004, 18(1): 89-92. [LI Hongyun, YANG Jihua. Evaluation of water conservation function of forest in south mountainous area of Jinan City [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2004, 18(1): 89-92.]
- [13] 郝向春. 灵空山主要森林类型枯落物生物量及持水性能[J]. 山西林业科技, 2000, 12(4): 1-3. [HAO Xiangchun. Litter biomass and its water capacity to the main forest types in Lingkongshan [J]. Shan Xi Forestry Science and Technology, 2000, 12(4): 1-3.]
- [14] 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): 29-32. [GONG Yuanbo, MA Zelong, CHEN Linwu, et al. Research on effects of water conservation 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): 29-32.]
- [15] 高人,周广柱. 辽宁东部山区几种主要森林植被类型土壤矿质层蓄水能力分析[J]. 沈阳农业大学学报, 2003, 34(1): 31-34. [GAO Ren, ZHOU Guangzhu. A study on mineral soil water-storage for six forest vegetation types in east Liaoning mountainous region [J]. Journal of Shenyang Agricultural University, 2003, 34(1): 31-34.]
- [16] 赵世伟,周印东,吴金水. 子午岭次生植被下土壤蓄水性能及有效性研究[J]. 西北植物学报, 2003, 23(8): 1389-1392. [ZHAO Shiwei, ZHOU Yindong, WU Jinshui. Study on soils water storage capacity and availability in secondary vegetation types in Ziwuling forest region [J]. Acta Botanica Boreali-occidentalia Sinica, 2003, 23(8): 1389-1392.]
- [17] 吴建平,袁正科,袁通志. 湘西南沟谷森林土壤水文—物理特性与涵养水源功能研究[J]. 水土保持研究, 2004, 11(1): 76-81. [WU Jianping, YUAN Zhengke, YUAN Tongzhi. Hydrological and physical characteristics of forest soil mountain valley in southwest of Hunan and its headwater conservation capacity [J]. Research of Soil Water Conservation, 2004, 11(1): 76-81.]

- [18] 夏江宝,杨吉华,李红云.不同外界条件下土壤入渗性能的研究[J].水土保持研究,2004,11(2):115-117.[XIA Jiangba, YANG Jihua, LI Hongyun. The research of soil infiltration in different outside factors[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2004, 11(2): 115-117.]
- [19] 刘霞.小流域生态修复过程中不同森林植被土壤入渗与贮水特征[J].水土保持学报,2004,18(6):2-5.[LIU Xia. Characteristics of soil infiltration and water holding of different forest vegetation in ecological rehabilitation of small water-shed[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2004, 18(6): 2-5.]
- [20] 金铭,李毅,王顺利,等.祁连山高山灌丛生物量及其分配特征[J].干旱区地理,2012,35(6):952-959.[JIN Ming, LI Yi, WANG Shunli, et al. Alpine shrubs biomass and its distribution characteristics in Qilian Mountains [J]. Arid Land Geography, 2012, 35(6): 952-959.]
- [21] 刘贤德,李效雄,张学龙,等.干旱半干旱山地森林类型的土壤水文特征[J].干旱区地理,2009,32(5):691-696.[LIU Xiande, LI Xiaoxiong, ZHANG Xuelong, et al. Hydrological characteristics of different forest types of soil in arid and semi-arid mountain [J]. Arid Land Geography, 2009, 32(5): 691-696.]
- [22] 雷蕾,刘贤德,王顺利,等.祁连山高山灌丛生物量分配规律及其与环境因子的关系[J].生态环境学报,2011,20(11):1602-1607.[LEI Lei, LIU Xiande, WANG Shunli, et al. Assignment rule of alpine shrubs biomass and its relationships to environmental factors in Qilian Mountains [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2011, 20(11): 1602-1607.]
- [23] 金铭,张学龙,刘贤德,等.祁连山林草复合流域灌木林土壤水文效应研究[J].水土保持学报,2009,23(1):169-172.[JIN Min, ZHANG Xuelong, LIU Xiande, et al. Analysis on soil and water conservation function of scrub forest in complex watershed on forestry and grasses of Qilian Mountains [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2009, 23(1): 169-172.]
- [24] 张学龙,罗龙发,敬文茂,等.祁连山青海云杉林截留对降水的分配效应[J].山地学报,2007,25(6):678-683.[ZHANG Xuelong, LUO Longfa, JING Wenmao, et al. Study on the distribution effect of canopy interception of *Picea crassifolia* forest on Qilian Mountains [J]. Journal of Mountain Science, 2007, 25(6): 678-683.]
- [25] 张学龙,成彩霞,敬文茂,等.祁连山森林土壤的水文生态效应[J].甘肃林业科技,2007,32(2):2-5.[ZHANG Xuelong, CHENG Caixia, JING Wenmao, et al. Study on hydro-ecological effects of forest soil on Qilian Mountains [J]. Journal of Gansu Forestry Science and Technology, 2007, 32(2): 2-5.]
- [26] 金铭,张学龙,刘贤德,等.祁连山林草复合流域灌木林土壤水文功能效应研究[J].水土保持学报,2009,23(1):169-181.[JIN Ming, ZHANG Xuelong, LIU Xiande, et al. Study on soil and water conservation function of scrub forest in complex watershed with forestry and grasses on Qilian Mountains [J]. Journal of Soil Water Conservation, 2009, 23(1): 169-181.]

Shrubbery eco-hydrological effect of forest-grass catchment of Qilian Mountains

ZHANG Ping¹, LIU Xian-de^{1,2}, ZHANG Xue-long², ZHAO Wei-jun²,
JING Wen-mao², WANG Shun-li²

(1 College of Forestry, Gansu Agriculture University, Lanzhou 730070, Gansu, China;

2 Academy of Water Resources Conservation Forests in Qilian Mountains of Gansu Province, Zhangye 734000, Gansu, China)

Abstract: From the ecological roles of the canopy layer, litter layer and soil layer, the paper probed into the eco-hydrological effects of five kinds' main shrubbery in the forest grass catchment of the Qilian Mountains. The results show as follows: (1) during rainy season, the average interception rates are as follows: *Berberis dasystachya* 22.46%, *Salix gilasanica* 20.48%, *Caragana jubata* 16.76%, *Potentilla fruticosa* 10.42%, *Caragana tangutica* 6.96%. (2) The maximum water holding rates of five kinds shrubbery's litter are 1.6 ~ 4.0 times of five kinds shrubbery litter's their weights; their maximum water holding amounts and maximum available water holding amounts are 23.83 ~ 134.95 t·hm⁻² and 17.25 ~ 83.62 t·hm⁻². (3) The soil maximum and available water holding amounts decrease with the increase in soil depth, they are 2 354.50 ~ 3 409.00 t·hm⁻² and 518.5 ~ 1015.50 t·hm⁻², respectively. (4) The mantle steady infiltration rates of various shrubbery land soils variate in the range of 7.88 ~ 96.01 mm·min⁻¹, the maximum belongs to *Salix gilasanica* of 96.01 mm·min⁻¹, then belonging to *Caragana jubata*, *Berberis dasystachya*, *Berberis dasystachya* and *Caragana tangutica*. (5) The capability of five kinds shrubbery's water conservation is ranged according to their magnitudes as follows: *Salix gilasanica* > *Berberis dasystachya* > *Caragana jubata* > *Potentilla fruticosa* > *Caragana tangutica*. Among them, *Salix gilasanica* and *Berberis dasystachya*'s capabilities are near or more than that of *Picea crassifolia*, which indicates that the shrubbery forest has stronger eco-hydrological function.

Key Words: the Qilian Mountains; complex watershed; shrubbery forest; eco-hydrology