

祁连山水源涵养林土壤水文特征研究

党宏忠¹, 周泽福¹, 赵雨森², 杨洪学²

(1. 中国林业科学研究院林业研究所, 国家林业局林木培育重点实验室, 北京 100091;

2. 东北林业大学林学院, 黑龙江 哈尔滨 150040)

摘要:通过对祁连山水源涵养林区的苔藓-青海云杉林、亚高山灌丛、灌木-青海云杉林、中低山灌木林和祁连圆柏以及牧草地等6种植被土壤水分物理性质的测定与计算,比较分析了不同植被的水源涵养能力,建立了主要土壤类型的入渗模型、土壤水分消退方程,评价了不同植被土壤层水文特征及其与植被间的关系。祁连山区主要森林的平均土壤密度均小于 $1\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$,土壤的蓄水能力很强但各植被间差异较大。各种森林植被土壤均表现出较高的入渗性能,土壤初渗率、稳渗率及蓄水能力从大到小的次序均为:苔藓-青海云杉林、亚高山灌丛、灌木-青海云杉林、中低山灌木林、祁连圆柏林和牧草地。在相同的环境条件下,森林土壤(山地灰褐土)的保水能力较高,水势消退曲线呈凸形,而牧草地土壤(山地栗钙土)的保水能力相对较弱,水势消退曲线呈凹形。土壤含水量相同时,后者所持水分的有效性更大。

关键词:祁连山;水源涵养林;土壤;水文

中图分类号:S715 **文献标识码:**A

Soil Hydrological Characteristics of Water Conservation Forest in Qilian Mountains

DANG Hong-zhong¹, ZHOU Ze-fu¹, ZHAO Yu-sen², YANG Hong-xue²

(1. Research Institute of Forestry, CAF; Key Laboratory of Tree Breeding and Cultivation, State Forestry Administration, Beijing 100091, China;

2. Forestry College of North East Forestry University, Harbin 150040, Heilongjiang, China)

Abstract: On the base of surveying and analyzing soil water physical characteristics of 5 main soil types of water conservation forest and grassland in Qilian Mountains, the water-holding capability and infiltration rate of soil layer were measured. Meanwhile, the water content loss equation and water potential equation were modeled too. It indicated: forest soil had low bulk weight which were all less than $1\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$, with high infiltration rate and high water-holding capability, although there existed marked difference among them which could be ranked in the order of moss-*Picea crassifolia*, sub-alpine shrubs, shrub-*Picea crassifolia*, mid-low-mountain shrubs, *Sabina przewalskii* and grassland. The water-holding capability of Grey-drab forest soil was higher than that of Castanozem grassland soil in the same environment condition (water loss for evaporation), the water loss curve of the former shaped in protruding and the latter was reversely, but the availability of soil water of the latter was higher while there were same water content level, and that played a more significant role to the life of forest especially in water deficient period.

Key words: Qilian Mountains; water conservation forest; soil; hydrology

收稿日期: 2004-11-23

基金项目: “十五”国家科技攻关项目(2001BA510B-02-05)部分研究内容

作者简介: 党宏忠(1971—),男,甘肃定西人,博士. E-mail: hzdang@forestry.ac.cn Tel: 010-62888318

在森林生态系统不同界面间的水分传输中,土壤层通过入渗、蓄纳等作用,对降水资源分配格局(形成、转化及消耗等过程)产生的影响最为明显,成为联系地表水与地下水的纽带,故有“土壤库”之说^[1,2]。林地土壤层的水文作用主要表现在透水和贮水性能两方面。水分只有在土壤中得到充分的涵养,才能有效的减弱地表径流的产生,调理河川径流,达到涵养水源的目的。林地土壤的水文特征不仅是气候、植被、地形及地质等自然条件综合作用的结果,而且也是森林生态系统水分小循环中林分结构与功能特征的综合体现。研究林地土壤的水文特征,是科学认识和评价土壤水文机理和功能大小的基础。

祁连山位于三大高原的交汇地带,地理位置特殊,自然环境独特,森林生态系统脆弱,是国家级重点自然保护区。区内大面积的水源涵养林处于“冰源水库”和河川水系之间,对调蓄、涵养水源起着巨大作用,并与冰川共同构成了巨大的复合天然水库,每年约有72.6亿m³的出山水通过石羊河、黑河和疏勒河三大内陆河水系,还有不少通过外陆河水系进入黄河支流^[3]。祁连山区属于半干旱森林草原气候带,森林植被垂直分布特征明显,分布于海拔2500~4000m的广阔范围内,在长期的演替中不仅形成了随生境变化(特别是垂直高度与坡向)而分布的典型森林植被群落,也发育了与植被群落相对应的土壤,长期以来,人们偏重于对青海云杉(*Picea crassifolia* Kom.)、祁连圆柏(*Sabina przewalskii* Kom.)等乔木树种林分土壤水文特征的研究^[4,5]。本文就区域内不同群落土壤水文特征的对比研究将为全面揭示群落、流域生态系统的水文机理与特征提供重要依据。

1 研究地概况

研究地选择在祁连山东端早泉沟流域,行政隶属于天祝县朵什乡,地理位置102°58'04"~103°01'04"E,37°14'40"~37°20'13"N,海拔2420~3306m,年平均气温1.2℃,生长期120~170d,生长季积温733~2000℃,年均降水量400mm,蒸发量1600mm,属大陆性寒温半湿润半干旱气候。森林植被以分布在阴坡、半阴坡的青海云杉纯林为主,海拔2900m左右的阴坡、半阴坡分布有青海云杉灌木混交林。在青海云杉林分布上限的阳坡、半阳坡小块状分布有祁连圆柏,海拔2980m以上主要分布

有以高山柳(*Salix gilashanica* L.)、杜鹃属(*Rhododendron* spp.)等为主的湿性亚高山灌丛。中、低山地带分布有绣线菊(*Spiraea salicifolia* L.)、金露梅(*Potentilla fruticosa* L.)、箭叶锦鸡儿(*Caragana jubata* (Pall.) Poir.)等耐旱灌木。

2 研究方法

选择典型森林植被群落苔藓-青海云杉林(山地灰褐土)、灌木-青海云杉林(山地淋溶灰褐土)、亚高山灌丛(亚高山灌丛草甸土)、中低山灌木林(山地灰褐土)4种林分为研究对象^[6],并以牧草地(山地栗钙土)为对照,各设置0.1hm²固定标准地2块,进行以下项目的测定:

(1)土壤水分物理性质 在固定标准地内分别设置0.01hm²样地并随机布设3个点,各点均分6层(0~10、10~20、20~40、40~60、60~80、80~100cm)取样,运用环刀取样法(100cm³)测定土壤孔隙度、土壤持水量和土壤密度,测定及计算方法采用国家标准《森林土壤水分-物理性质的测定》(GB 7835-87)。

(2)土壤入渗特性 在上述样地内随机布设3个点,扫去枯枝落叶层和用利铲除掉苔藓层(保证土壤结构不破坏),将双环测渗仪(外环直径50cm,内环直径30cm,高25cm)打入土壤内10cm,将2个精度为1mm的直尺立于内环的内、外壁,同时快速往外、内环中灌水,水层厚度10cm时即刻读取秒表,记录水分入渗量及时间,水层为零时迅速填水至10cm处,记录下渗的时间与高度。计算表层土壤初渗速率、稳渗时间及稳渗速率等指标,计算方法采用国家标准《森林土壤渗透性的测定》(GB 7838-87)。

(3)土壤水分消退过程曲线测定 以典型森林(苔藓-青海云杉林)土壤类型(山地灰褐土)和牧草地土壤类型(山地栗钙土)为研究对象。挖取120cm(高)×50cm(直径)的圆柱形原状土柱,装入特制的纤维袋内(保证土壤结构不破坏),充分浇灌2d后插入调试好的土壤水分张力计,置于自然状态下失水(模拟自然状态下的土壤蒸发失水过程,下雨时用篷布遮盖)。每天清晨观测张力计读数(土壤水势),在同层3处取土样用烘干法测定土壤水分含量,连续测定直至土壤水势无明显变化时为止。土壤水势的测定方法采用国家标准《森林土壤水势的测定》(GB 7834-87)。室内分析土壤水分消退

过程。

3 结果与分析

3.1 土壤水分物理性质

从表1可以看出,苔藓-青海云杉林、亚高山灌丛、灌木-青海云杉林和中低山灌木林地土壤的非毛管孔隙度、非毛管持水量均较祁连圆柏林和牧草地高,说明青海云杉和灌木对林地土壤结

构的改善作用更高,增加了土壤的渗透性能。土壤密度可说明土壤的松紧程度及孔隙状况,除牧草地土壤密度较大($1.05 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$)外,其余均小于 $1.0 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$,反映了林地土壤具有良好结构。祁连圆柏土壤密度大,土壤坚实,这与其分布生境条件差,林分结构不良,土壤非毛管孔隙度小等特点是一致的。

表1 不同植被类型0~100 cm土层的土壤水分物理性质

植被类型	平均孔隙度/%		平均持水量/%			平均土壤密度/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)
	总孔隙	非毛管孔隙	最大持水量	非毛管持水量	田间持水量	
苔藓-青海云杉林	68.38	18.62	144.00	39.22	74.92	0.48
亚高山灌丛	72.69	14.10	107.34	20.03	71.63	0.70
灌木-青海云杉林	72.08	11.92	117.94	19.68	81.66	0.62
中低山灌木林	61.52	10.83	82.80	14.70	46.14	0.76
祁连圆柏林 ^①	-	7.57	68.83	8.14	-	0.93
牧草地	61.48	5.98	58.88	5.73	43.90	1.05

注:①引自傅辉恩等(1989)^[5]。

表1还表明,在100 cm土层内,苔藓-青海云杉林、亚高山灌丛、灌木-青海云杉林、中低山灌木林和祁连圆柏林5种森林植被林地土壤持水能力都较高,最大持水量依次分别为683.75、716.24、724.78、611.22和640.12 mm,反映了土壤贮蓄水分潜力的相对大小。在评价森林土壤的水文效应时,非毛管持水量对水文的贡献最大最为直接,经换算5种森林植被土壤的非毛管持水量依次分别为186.21、144.37、114.89、102.63和75.70 mm,而对照牧草地平均为65.96 mm。苔藓-青海云杉林单位厚度的土壤蓄水能力最高,其次依次为亚高山灌丛、灌木-青海云杉林、中低山灌木林、祁连圆柏林和牧草地,后二者均小于 $1 \text{ mm} \cdot \text{cm}^{-1}$ 。

3.2 土壤入渗特征分析

森林土壤入渗性能的高低对森林生态系统涵

养水源的能力影响最大。测定结果表明(表2),祁连山各主要类型的森林植被林地土壤初始入渗速率均高于牧草地,其大小依次为苔藓-青海云杉林、亚高山灌丛、灌木-青海云杉林和中低山灌木林,均高于祁连圆柏林($3.6 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$)^[5]和牧草地。苔藓-青海云杉林活地被物发育良好,特别是苔藓对土壤结构改良作用更大,土壤有机质含量和团聚化程度均高,初始入渗速率最高。主要由金露梅、绣线菊等阳性灌木组成的灌木林林分结构单一,对土壤结构改良作用较差。牛羊的频繁践踏也使表层土壤的坚实度增大,降低了土壤的初始入渗速率。祁连圆柏林非毛管孔隙度最低,土壤初始入渗速率也最低。

表2 Horton入渗模型估计的稳渗速率与观测值的比较

植被类型	相关系数	解释方差/%	参数 <i>b</i>	稳渗速率/($\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$)		初始入渗速率/ ($\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$)
				预估值	观测值	
苔藓-青海云杉林	0.96	92.243	0.120	10.38	11.20	21.00
灌木-青海云杉林	0.77	59.508	0.102	3.74	3.98	6.00
亚高山灌丛	0.88	78.297	0.145	4.48	4.64	7.50
中低山灌木林	0.89	79.503	0.149	2.61	2.76	5.50
牧草地	0.95	90.854	0.120	0.40	0.56	2.50

测定结果还表明(表2),各林地土壤稳渗速率的相对大小具有与初始入渗速率相似的排序,其大

小依次为苔藓-青海云杉林($11.2 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$)、亚高山灌丛($4.64 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$)、灌木-青海云杉林

($3.98 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$) 和中低山灌木林 ($2.76 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$), 均高于祁连圆柏林 ($0.80 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$)^[5] 和牧草地 ($0.56 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$), 这说明除祁连圆柏林地和牧草地对照外, 其余林地均具有较高的稳定入渗速率, 降水强度很少能达到或超过稳定入渗速率的水平而产生超渗径流, 在长时间降水后产流将主要以蓄满产流和壤中流为主, 这与黄土高原区土壤的产流特征有很大的不同^[7]。

为进一步阐述不同植被土壤的入渗特征, 以常用的 5 种模型进行不同林地土壤入渗过程的模拟, 公式表达式如下:

Kostiakov (1932)^[8,9] 入渗公式: $f(t) = at^{-b}$

Horton (1933)^[8,9] 入渗公式:

$$f(t) = fc + (f_0 - fc)e^{-at}$$

Green-Ampt & Philip^[10] 综合公式:

$$f(t) = Mt^{-1/2} + N$$

Green-Ampt (1911)^[10] 入渗公式:

$$f(t) = at^{-1/2} + f_c$$

蒋定生 (1986 年)^[11] 公式:

$$f(t) = fc + (f_1 - fc)/t^a$$

式中: f_1 为第 1 分钟末的入渗速率 ($\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$), f_0 为初始入渗速率, $f(t)$ 为 t 时刻的入渗速率, f_c 为稳渗速率, t 为时间, a, b, M, N 为待定参数。

从表 3 看出, 从相关系数比较看, 各林地土壤入渗模型均以 Green-Ampt & Philip 综合公式拟合效果最好, 其次依次为 Kostiakov 入渗公式、Horton 入渗公式。Horton 入渗公式与蒋定生入渗公式中包含有初始与稳定入渗速率值参数, 因而更具有直观的物理学意义。尤其是在实际测定中, 土壤的初始入渗速率相对较容易测定, 而平稳入渗时刻较难掌握, 根据数理统计原理, 单参数的最优估计为算术平均值, 但对动态过程采用简单的平均方法是难处理的, 为此将 Horton 入渗公式中的稳定入渗速率 f_c 作为参数进行拟合, 拟合结果表明 (表 2), 用该模型预估的稳定入渗速率与观测值很接近, 可见用 Horton 入渗公式作为土壤入渗模型更具有物理学意义。

表 3 不同模型模拟土壤入渗速率

植被类型	Green-Ampt & Philip 综合公式			Kostiakov 入渗公式			Horton 入渗公式		Green-Ampt 入渗公式		蒋定生公式	
	R	M	N	R	a	b	R	a	R	a	R	a
苔藓-青海云杉林	0.98	19.385	7.147	0.97	24.139	0.246	0.96	0.133	0.74	8.164	0.84	0.736
灌木-青海云杉林	0.78	4.451	3.061	0.77	6.815	0.171	0.76	0.130	0.59	1.907	0.64	0.676
亚高山灌丛	0.92	5.403	3.478	0.89	8.003	0.177	0.88	0.168	0.68	2.185	0.80	0.789
中低山灌木林	0.91	5.390	1.592	0.89	6.398	0.275	0.88	0.169	0.67	2.157	0.79	0.779
牧草地	0.98	3.789	-0.232	0.98	3.798	0.610	0.94	0.148	0.74	1.596	0.84	0.742

图 1 是以 Horton 模型模拟土壤入渗过程而绘制的人渗曲线图, 反映了各林地土壤不同时刻的人渗速率变化情况以及达到平稳入渗的时刻和稳渗率。根据土壤水分所受的作用力和运动特性, 林地土壤入渗曲线的总趋势大致可分为 3 个阶段:

(1) 快速渗润期 (0 ~ 5 min) 为入渗过程的初始阶段, 水分一方面主要在分子力的作用下, 被土粒快速吸附成为薄膜水, 另一方面快速填满表层土壤的孔隙, 并形成一定的水压 (水势梯度), 下渗锋面快速延伸。该阶段受不同土壤类型土壤水分物理性质差异的影响较大。苔藓-青海云杉林、亚高山灌丛、灌木-青海云杉林和中低山灌木林 5 min 末的人渗速率分别为 15.82 、 5.89 、 5.05 和 $4.00 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$, 牧草地为 $1.46 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ 。

(2) 渗漏期 (5 ~ 30 min) 下渗水分在毛管力和重力的作用下, 在土壤孔隙中向下不稳定流动, 并逐步填充表层以下土壤孔隙, 直至全部孔隙为水分所

饱和, 下渗速率由递减较快趋于稳定。这一阶段主要是包气带内土壤孔隙水分的充填过程。

(3) 稳渗期 (30 min 以后) 土壤孔隙被水分充满, 水分在重力的作用下向下做渗透运动。这一阶段包气带内的孔隙全部为水分所充满而形成饱水带, 并由土粒和水分的二相系统组成。此时下渗速率接近常量, 苔藓-青海云杉林、亚高山灌丛、灌木-青海云杉林、中低山灌木林分别为 10.69 、 4.46 、 3.87 和 $2.58 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$, 而牧草地仅为 $0.46 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ 。

土壤稳定入渗速率是反映充分供水时土壤水分饱和时入渗性能的良好指标, 在入渗过程中下层土壤由于受透水性弱的影响, 水分的增加使得土壤胶体膨胀, 同时被水侵蚀下沉的土壤微粒填入孔隙, 使土壤孔隙量逐渐减少。土壤稳渗率是能反映土壤孔隙结构状况并与前期含水量间无明显直接关系的可靠指标。

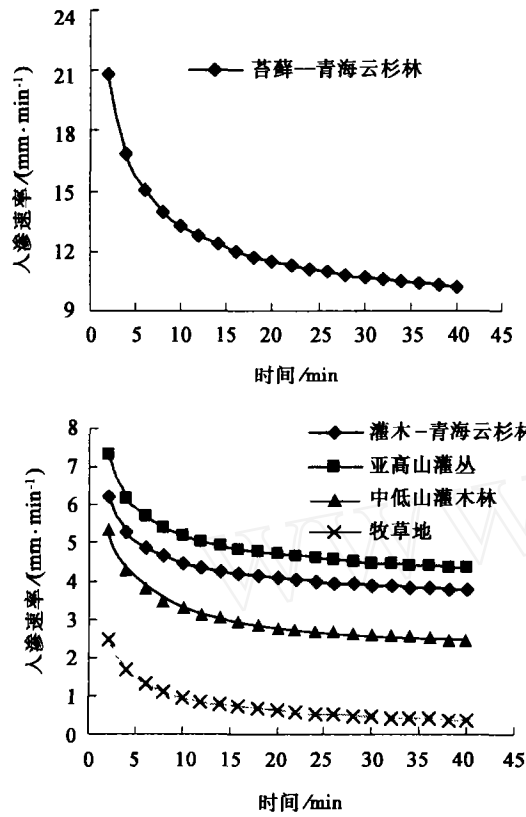


图 1 用 Horton 模型模拟不同林地土壤入渗曲线

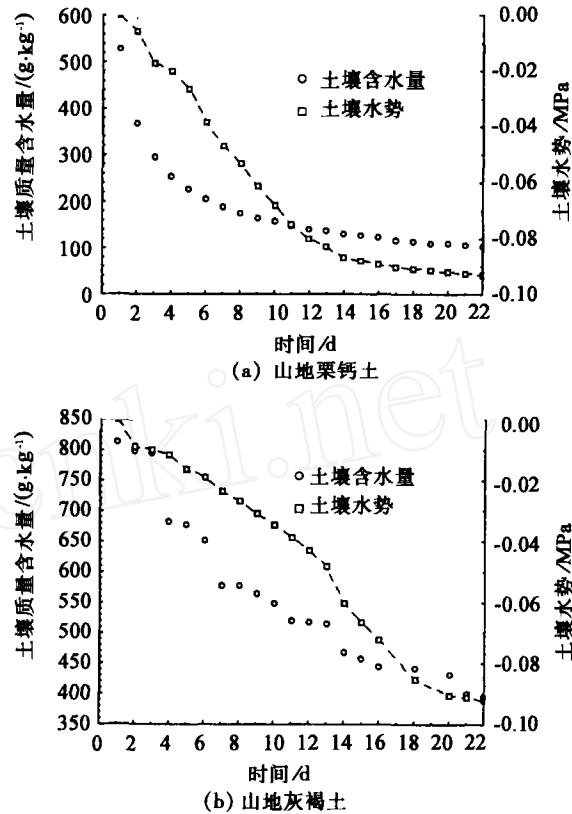


图 2 土壤水分消退过程曲线

3.3 土壤水分消退过程分析

土壤水分消退过程反映了土壤保水能力的强弱,这一特征可以从对充分饱和后的土壤在自然状态下模拟水分蒸发试验研究来阐述。图 2 表明,在饱和或近饱和状态下,山地灰褐土和山地栗钙土的土壤水分早期消退都较快,此时土壤水分主要在重力作用下向下传输, pF 一般小于 2, 为无效水分,这部分水排除越快,越有利于提高林地的水源涵养能力。2 d 后山地栗钙土土壤质量含水量降为 $333.7 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 接近田间持水量; 1~7 d 土壤含水量平均每日降低 $54.3 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 土壤的毛管作用仍然强烈,水分以毛管悬着水为主; 7~20 d 间土壤水分流失速率较低,含水量平均每日减少 $8.8 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 土壤水分的毛管作用渐减,而分子力作用仍较强烈; 20 d 后土壤含水量变化很小,土壤水分主要以分子力结合。土壤水势下降曲线呈凹形,一开始下降就较快,水势以压力势为主, 1~15 d 水势下降 0.087 MPa , 之后水势下降平缓,平均每日降低 0.005 MPa , 水分与土粒结合加强,水分以基模势为主,这表明山地栗钙土保水性能较弱,水分流失快。

山地灰褐土质地、结构良好,土壤吸附表面积和孔隙直径的大小均优于山地栗钙土,饱和持水量较高, 13 d 后土壤含水量下降到 $514.0 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 才接近田间持水量,土壤含水量平均每日降低 $25 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。山地灰褐土土壤水势的变化曲线与山地栗钙土不同,呈凸形,一开始下降较平缓, 1~13 d 水势仅降低 0.048 MPa , 之后水势下降相对较快, 13~20 d 平均每天下降 0.0061 MPa 。

在自然物理蒸发失水的情况下, 20 d 后 2 种类型土壤水势下降速度均明显减小并趋于一致, 22 d 后水势约为 0.092 MPa 。测定期间山地灰褐土的水分流失量 ($441.1 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$) 略高于山地栗钙土 ($418.5 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$), 但此时山地灰褐土土壤含水量 ($395.3 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$) 大大高于山地栗钙土 ($73.9 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$), 进一步说明山地灰褐土的持水性能远比山地栗钙土的高。

多种函数拟合比较的结果表明,指数模型为土壤水分消退过程拟合优化模型:

$$\text{山地灰褐土: } WC = 91.50604 t^{-0.2352886}$$

$$(R = 0.95, f_{n-2} = 18, r_{\alpha=0.01} = 0.561)$$

$$\text{山地栗钙土: } WC = 52.74807 t^{-0.5279168}$$

($R=0.98$, $f_{n-2}=20$, $r_{\alpha=0.01}=0.537$)

式中: WC 为土壤含水量 ($g \cdot kg^{-1}$), t 为水分饱和后消退时间 (d), R 为相关系数, f_{n-2} 为剩余自由度, $r_{\alpha=0.01}$ 为显著性临界水平。

4 结 论

(1) 在土壤的水分物理性质中, 苔藓-青海云杉林、亚高山灌丛、灌木-青海云杉林、中低山灌木林和祁连圆柏 5 种森林植被土壤的非毛管孔隙度、非毛管持水量均较对照牧草地高, 土壤密度均小于 $1.0 g \cdot cm^{-3}$, 在 100 cm 土层厚度内土壤最大持水量依次分别为 683.75、716.24、724.78、611.22 和 640.12 mm, 非毛管持水量依次分别为 186.21、144.37、114.89、102.63 和 75.70 mm, 反映了森林植被特别是青海云杉与灌木树种对改善林地土壤结构, 增加土壤蓄水能力方面的巨大作用。祁连圆柏林和牧草地单位厚度土层非毛管蓄水量均小于 $1 mm \cdot cm^{-1}$ 。

(2) 5 种森林植被的初始入渗速率与稳渗速率均具有相似的排序, 依次分别为(括号内为稳定入渗速率) 苔藓-青海云杉林 $21.0(11.2) mm \cdot min^{-1}$ 、亚高山灌丛 $7.5(4.64) mm \cdot min^{-1}$ 、灌木-青海云杉林 $6.0(3.98) mm \cdot min^{-1}$ 、中低山灌木林 $5.5(2.76) mm \cdot min^{-1}$ 和祁连圆柏林 $3.6(0.8) mm \cdot min^{-1}$, 高入渗速率使得在长时间降水后产流以蓄满产流和壤中流为主, 这与黄土高原区土壤的产流特征(主要为超渗产流)有很大的不同。

(3) 林地土壤下渗过程大致可分为 3 个阶段, 即快速渗润期 ($0 \sim 5 min$)、渗漏期 ($5 \sim 30 min$) 稳渗期 ($30 min$ 以后)。林地土壤入渗曲线模型均以 Green-Ampt & Philip 综合公式拟合效果最好, 其次

依次为 Kostiaikov 入渗公式、Horton 入渗公式。Horton 入渗公式作为土壤入渗模型更具有物理学意义。

(4) 在相同的自然物理蒸发环境中, 山地栗钙土土壤含水量的下降比山地灰褐土的快, 持水、蓄水性能低于山地灰褐土。在土壤含水量相同的情况下, 山地灰褐土保持水分的能力明显高于山地栗钙土, 这表明随着质地变细, 土壤的持水能力加大, 但相同水分含量时所保持水分的有效性会降低。

参 考 文 献:

- [1] 马雪华. 四川米亚罗地区高山冷杉林水文作用的研究[J]. 林业科学, 1987, 23(3): 253 ~ 265
- [2] 刘世荣, 温远光, 王兵, 等. 中国森林生态系统水文生态功能规律[M]. 北京: 中国林业出版社, 1996: 300 ~ 710
- [3] 车克钧, 傅辉恩, 贺红元. 祁连山水源涵养林效益的研究[J]. 林业科学, 1992, 28(6): 544 ~ 548
- [4] 车克钧, 傅辉恩, 王金叶. 祁连山水源林生态系统结构与功能的研究[J]. 林业科学, 1998, 34(5): 29 ~ 37
- [5] 傅辉恩, 车克钧. 祁连山(北坡)森林水文效应的研究[A]. 见: 中国林学森林水文与流域管理委员会. 全国森林水文学术讨论会文集[C]. 北京: 测绘出版社, 1989: 1 ~ 44
- [6] 甘肃省土壤普查办公室. 甘肃土壤[M]. 兰州: 农业出版社, 1993: 1 ~ 45
- [7] 陈丽华, 余新晓. 晋西黄土地区水土保持林地土壤入渗性能的研究[J]. 北京林业大学学报, 1995, 17(1): 42 ~ 47
- [8] 康绍忠, 张书函, 聂光镛, 等. 内蒙古敖包小流域土壤入渗分布规律的研究[J]. 土壤侵蚀与水土保持学报, 1996, 2(2): 38 ~ 46
- [9] 吴长文, 王礼先. 林地土壤的入渗及其模拟分析[J]. 水土保持研究, 1995, 2(1): 71 ~ 75
- [10] 王全九, 来剑斌, 李毅. Green-Ampt 模型与 Philip 入渗模型的对比分析[J]. 农业工程学报, 2002, 18(2): 13 ~ 16
- [11] 蒋定生, 黄国俊. 黄土高原土壤入渗速率的研究[J]. 土壤学报, 1986, 23(4): 299 ~ 304