

岷江上游杂谷脑河流域林树下线 土壤持水性及影响因素

方露¹, 李晓宁¹, 唐香君^{1,2}, 樊敏¹, 幸艳¹, 赵丽¹

(1. 西南科技大学, 环境与资源学院, 四川 绵阳 621010; 2. 苍溪县发展和改革局项目信息中心, 四川 广元 628400)

摘要:在岷江上游杂谷脑河流域特殊的地理环境背景下,土壤水分成了限制林树下线树木生长和分布的关键因子,采用野外定位试验与室内试验相结合的方法,对岷江上游杂谷脑河流域具有代表性的林树下线土壤持水性及物理性质进行了研究,利用 Gardner 经验方程拟合出其土壤水分特征曲线,研究林树下线土壤持水性及其影响因素。结果表明:(1)典型土壤拟合参数 a 值大部分在 20 以上,同一种林地类型,土壤持水能力表现为阴坡>阳坡;同一坡向土壤持水能力为天然林阴坡>人工林;不同土层深度土壤持水能力为表层>下层(人工林阳坡除外)。(2)天然林和人工林的比水容重均表现为:阳坡>阴坡;阴坡和阳坡的比水容重在土层剖面上无明显规律。这说明土壤的供水能力受坡向影响大,植被类型、土层深度影响小。(3)岷江上游山区林地土壤以粉粒最多,黏粒最少,砂粒居中,且阳坡林地砂粒含量低于阴坡,粉粒和黏粒含量高于阴坡;阴坡林地土壤容重随海拔的升高而递增,阳坡林地土壤容重随海拔的升高而呈先增后减的规律,阴坡的土壤容重明显低于阳坡;林地土壤孔隙度结构总体阴坡优于阳坡。(4)林地土壤持水性与黏粒、非毛管孔隙度呈极显著正相关,与容重和毛管孔隙度呈显著正相关,退耕还林工程中,大量种植的结果林和生态林能有效改善土壤的质地。因此,在当地进行植被恢复过程中,首先要考虑的就是土壤水分问题,应当从海拔交错带逐步向下进行,最终达到岷江上游干旱河谷困难地段的植被恢复可以顺利进行的目。

关键词:岷江上游; 林树下线; 土壤水分特征曲线; 比水容重; 土壤物理性质

中图分类号: S152.7⁺1

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2018)05-0095-08

Research on Water-holding Capacity and Related Factors in Zagunao River Basin in the Upper Reaches of Min River

FANG Lu¹, LI Xiaoning¹, TANG Xiangjun^{1,2}, FAN Min¹, XING Yan¹, ZHAO Li¹

(1. School of Environment and Resources, Southwest University of Science and Technology, Mianyang, Sichuan 621010, China;

2. County Project Information Center of Cangxi County Development and Reform Bureau, Guangyuan, Sichuan 628400, China)

Abstract: Under the special geographical environment of Zagunao River Basin in the Upper Reaches of Min River, the soil moisture has become a key factor limiting the plant growth and distribution of the timberline. Field experiments and laboratory experiments were conducted to study the soil water-holding capacity and physical properties of typical forest trees in Upper Reaches of the Min River, the Gardner experience equation was utilized to plot a soil water characteristic curve, and the soil water-holding capacity and the influencing factors were investigated. The results showed that: (1) the fitted parameter a value of typical soil reached up to 20; (2) in the same type of woodland, soil water holding capacities of natural forest and plantation in the shady slopes were all better than sunny slopes; and in the same slopes, soil water holding capacities of plantations were better than those of the natural forests; the soil water holding capacities of surface soil were better than the deeper layer (except for artificial forest in the sunny slopes), which indicated that the water supply capacity of soil was affected greatly by the slope direction, and the vegetation type and soil depth have little influences; (3) silt content of the mountain forest soil of the upper reaches of the Min River forest soil was the highest, and the contents of clay size and sand contents were the least and middle, respectively; the soil sand content in shady slopes was higher than that of the sunny slope, and the silt content and

收稿日期: 2017-09-29

修回日期: 2017-11-29

资助项目: 四川省教育厅项目“岷江上游土壤环境质量对退耕还林驱动的林树下线下移的响应”(16ZB0139); 研究生创新基金“冻融作用下川西北高寒土壤水热运移研究”(17ycx038); 本科生创新基金“岷江上游土壤质量对退耕还林驱动的林树下线下移的响应”(cx17-043)

第一作者: 方露(1996—), 女, 四川泸州人, 本科在读, 主要从事土壤生态环境质量与变化方面的研究。E-mail: 164872747@qq.com

通信作者: 赵丽(1981—), 女, 四川南充人, 博士, 主要从事土壤生态环境质量与变化方面的研究。E-mail: zhaoli@163.com

clay contents were lower in sunny slope; the soil bulk density of forest increased with the increase of the altitude in the shady slope, and the soil bulk density increased first and then decreased with the increase of altitude in the sunny slope; the soil bulk density of the shady slope was significantly lower than that in sunny slope; the soil porosity structure was better than that of the sunny slope; (4) the soil water holding capacity of forest land was most significantly correlated with clay contents and non-capillary porosity and significant correlated with bulk density and capillary porosity, and the economic and ecological forests could improve the soil texture of large planting after the project of returning farmland to forest. Therefore, the soil moisture is the most important limiting factor in the process of local vegetation restoration. Vegetation restoration should be carried out step by step from the high altitude ecotone, and the purpose of vegetation restoration can be achieved ultimately in the difficult valley of the upper reaches of Min River.

Keywords: upper research of Min River; timberline; soil water characteristic curve; specific water capacity; soil physical properties

土壤水分是土壤重要的物理组成成分,对森林生态系统径流产生、蒸散过程、水分循环和水量平衡具有极其重要的意义^[1]。土壤水分不仅直接影响土壤的特性和植物的生长,而且还间接影响植物的分布,其变化特征受土壤理化性质、区域气候特征和植被类型等外界条件的密切影响^[2]。岷江上游干旱河谷聚落区是山区人类生存的重要空间形式,也是山区人地关系的集中反映,聚落区具有独特的生态位势、突出的水热矛盾以及不合理的人类活动导致该区具有高风险生态退化和低阈值生态安全的特点。近 10 多年来,该区作为四川省退耕还林工程的主要实施区域,流域内局地环境发生较大改善,形成了高山林线(上线)与 V 型河谷上部林树下线并存的地理生态格局。研究表明:(1) 聚落区林树下线 10 年间向低海拔空间移动达 108.6 m,而非聚落区仅为 38 m;(2) 林树下线空间移动与湿度/水分的垂直变化密切相关;(3) 岷江

上游林树下线与干旱河谷线间的交错带,在抑制干旱河谷上延和延伸亚高山森林生态系统的功能等方面具有十分重要的作用^[3]。关于该区的研究主要是干旱河谷山地森林—干旱河谷交错带地区不同土地利用类型、不同植被类型土壤水分、土壤水分与土壤物化性质、水源涵养的关系的相关研究^[4]。林树下线是在干旱河谷这一特定自然环境背景下,植被适应山地气候垂直分异的特殊地理生态现象,是特指岷江上游干旱河谷区 2 200 m 左右的小叶灌木与落叶阔叶林及孤立“树岛”的混合区域,是林树下线至于干旱河谷线的“灌丛—林树”交错区域(图 1),关于林树下线土壤水分的研究,目前关于该方面的报道较少,因此,明确岷江上游林树下线与土壤水分的空间分布特征及其影响因素,有利于揭示岷江上游退耕还林工程主要实施区的林树下线与山地环境之间的演化规律,并为干旱河谷生态恢复提供科学依据。

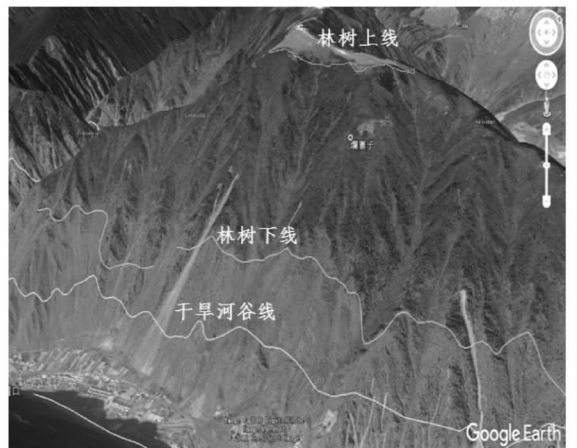
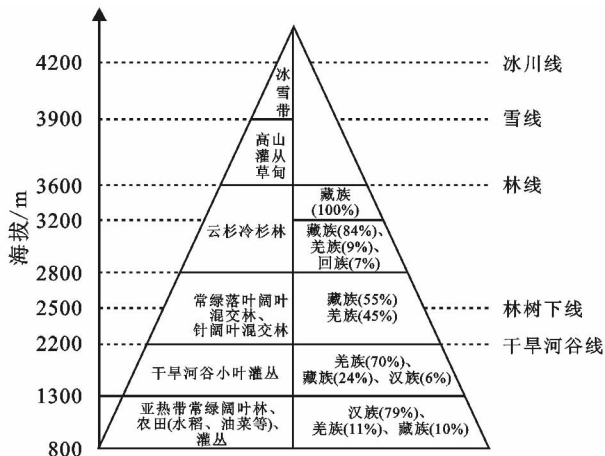


图 1 林树下线及其生态交错带示意图

1 材料与方法

1.1 研究区概况

岷江上游杂谷脑河流域位于四川省西北部,阿坝藏族自治州东南缘(31°11′52″—31°55′7″N,102°35′36″—

103°6′11″E),发源于四川省阿坝藏族羌族自治州理县西北的鹧鸪山南麓的红水沟,全长 157.4 km,流域面积 92.64 km²,流域边界与理县行政边界一致,由西北向东南斜贯理县全境,在位置上东南接汶川,西连马尔康,西南靠小金,西北与红原相邻,北与黑水和茂汶羌

族自治县接壤,是岷江水系的一级支流(图 2)。该流域地貌属于典型的中山和高山峡谷,流域内最高海拔为 5 840 m,最低海拔为 1 419 m^[4]。杂谷脑河流域具有山地季风气候的特点,气候较为寒冷,冬长夏短,年温差小,日温差大;降雨量较少,空气干燥,日照充足,辐射强烈^[5]。受到复杂的山地型立体气候、立体植被、立体地貌和各种成土母质以及人为耕种熟化诸因素的综合影响,流域内土壤呈明显的垂直地带性分布特征,在海拔 1 419~4 400 m 范围内主要土壤类型有:山地灰褐土、褐色土、棕壤、暗棕壤、灰化土、亚高山草甸土、高山草甸土和高山寒漠土^[6]。

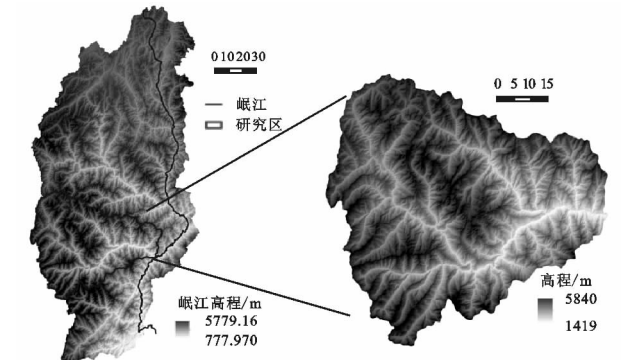


图 2 岷江上游杂谷脑河流域地理位置

1.2 研究方法

1.2.1 样品采集和测定

(1) 样地布设与样品采集。在对杂谷脑河流域全面调查基础上,依据林树下线的分布规律和特点,选取小西山村和佳山村、三寨村和九子村 4 个典型区域的林树下线及其土壤为研究对象,设立样地(表 1),共采集 62 个样点。

表 1 研究区不同地形与植被类型取样点数量分布

分类	植被类型	样点数/个	海拔/m	样点数/个	坡度/(°)	样点数/个
1	车厘子	7	<1800	11	<15	15
2	李子	10	1800~2000	8	15~20	4
3	苹果	4	2000~2200	11	20~25	14
4	洋槐	6	2200~2400	22	25~30	15
5	灌丛	19	2400~2600	5	30~35	9
6	森林	16	>2600	5	>35	5

注:灌丛主要植物为锥花小蘗灌丛,森林主要植物为洋槐。

依据海拔高度、水平分布、坡向、土壤剖面纵深进行取样。依据从河谷到高山林线海拔高度的变化,高程每升高 200 m 进行采样,并选取附近荒地同时进行采样,作为背景值;在水平方向、不同坡度和坡向上,选择经纬度在一个范围内的林树下线土壤进行采样;阳坡和阴坡分别选择 5 个样地进行采样。以上采样均按照土壤剖面垂直纵深布点采样,取样深度为 75 cm,分 5 个层次,各个层次分别为 0—15 cm,15—30 cm,30—45 cm,45—60 cm,60—75 cm,所有采样

均设置 3 个重复。采样时间为 2015 年 9 月下旬到 2015 年 10 月中旬。

1.2.2 测定项目及方法

(1) 土壤物理性质测定:本研究主要测定对土壤持水特性有较大影响的土壤物理性质,包括土壤容重、孔隙度及颗粒组成。这些物理性质的测定参照《土壤农业化学分析方法》^[7],土壤容重和孔隙度采用环刀法测量,土壤颗粒组成采用贝克曼库尔激光粒度仪进行测定。

(2) 土壤水分特征曲线的测定^[7]:本研究采用脱水曲线来讨论土壤持水性问题。采用 H-1400 pF 型压力膜仪分别测定 0.1,0.3,1,2,5,15 MPa 共 6 个水平下的土壤水分重量。

模拟和拟合土壤水分特征曲线的方程很多^[8],刘小宁和姚其华等^[9-10]认为与其他模型相比,Gardner 的幂函数方程具有待定参数较少的优点,在实际应用中更为方便。因此,本文采用 Gardner 模型拟合得到土壤水分特征曲线:

Gardner 模型表示水分特征曲线的表达如式(1):

$$\theta=aS^{-b} \tag{1}$$

式中: θ 为重量含水量(%); S 为土壤水吸力(MPa); a 和 b 为非线性回归系数。

(3) 比水容量的测定:土壤水分特征曲线斜率即单位基质势的变化引起含水量变化,称为比水容量。它表示单位吸力变化时单位质量土壤可释放或储存的水量,可反映土壤可释出的供给植物吸收水量的程度,是评价土壤持水性强弱的关键参数^[11-12],记为 C_θ (ml/10·MPa·g)

$$C_\theta=-\frac{d\theta}{dS} \tag{2}$$

式中: θ 为重量含水量(%); S 为土壤水吸力(MPa)。

对土壤特征水分曲线的斜率求导可得:

$$C_\theta=a\times b\times S^{-(b+1)} \tag{3}$$

式中: a 和 b 为土壤持水曲线拟合参数。

(4) 数据处理。采用 Microsoft Excel 绘制图表以及土壤水分特征曲线,运用 SPSS 软件对数据进行统计分析,Pearson 相关分析法分析土壤持水性与土壤物理性质的相关性。

2 结果与分析

2.1 林树下线土壤持水特征

2.1.1 不同剖面深度土壤水分特征 土壤水分特征曲线是描述土壤水吸力与土壤含水量之间变化关系的曲线,既可以反映土壤持水性和土壤水分的有效性,又能体现土壤水分的数量与能量之间的变化关系。通过对天然林与人工林两个坡向 4 种立地条件下土壤水分特征曲线进行拟合,分析同一立地条件不同土层深度下土壤水分特征曲线的变化规律,揭示其

各个土层土壤持水能力。阴坡和阳坡天然林、人工林土壤参数拟合结果见表 2,拟合曲线见图 3 和图 4。

利用 Gardner 模型拟合的土壤水分特征曲线 a 值越小,持水能力越弱,反之亦然; a 值不变时, b 值越小,则曲线越远离水势轴,可以反映出土壤含水量随吸力变化的快慢程度^[13]。从表 2 可以看出,拟合的土壤水分特征曲线相关系数 R^2 均在 0.90 以上,拟合相关性较好。根据阳坡和阴坡天然林、人工林不同深度土壤 a 值可知:除阳坡人工林 15—30 cm 和 60—75 cm 土壤 a 值低于阴坡各层土壤 a 值外,阳坡天然林和人工林 0—15 cm, 30—45 cm 和 45—60 cm 土壤 a 值均高于阴坡天然林和人工林各层土壤。阳坡天然林 0—15 cm 土壤 a 值最高达到 63.447,阴坡天然林 15—30 cm 和 45—60 cm 土壤 a 值最小,均小于 20.000;阳坡天然林 30—75 cm 土壤和

阳坡人工林 0—15 cm 土壤 a 值均在 30—40,其余土壤 a 值均在 20~30。阳坡人工林深层土壤(45—60 cm) a 值较大,阳坡天然林和人工林、阴坡天然林均是表层(0—15 cm) a 值最大。

以参数 b 为评价参数,阴坡天然林土壤含水量随吸力增加而减少的快慢程度为 60—75 cm>30—45 cm>45—60 cm>0—15 cm>15—30 cm;阳坡天然林土壤含水量随吸力增加而减少的快慢程度为 60—75 cm>45—60 cm=30—45 cm>0—30 cm;同理可知,阴坡人工林下层土壤(30—75 cm) b 值大于上层土壤(0—30 cm),说明下层土壤含水量随吸力增加而减少的程度最快;阳坡人工林上层土壤(0—30 cm) b 值大于下层土壤(30—75 cm),上层土壤含水量随吸力增加而减少的程度最快。

表 2 阳坡和阴坡天然林、人工林土壤的水分特征曲线拟合方程及拟合参数

坡向	土壤类型	土层深度/cm	拟合方程	统计分析			
				a	b	R^2	ab
阴坡	天然林	0—15	$\theta=27.443S^{-0.009}$	27.443	0.009	0.923	0.247
		15—30	$\theta=18.455S^{-0.018}$	18.455	0.008	0.916	0.148
		30—45	$\theta=22.581S^{-0.014}$	22.581	0.014	0.983	0.316
		45—60	$\theta=16.035S^{-0.011}$	16.035	0.011	0.952	0.176
		60—75	$\theta=20.295S^{-0.019}$	20.295	0.019	0.946	0.386
阳坡	天然林	0—15	$\theta=63.447S^{-0.007}$	63.447	0.007	0.904	0.444
		15—30	$\theta=29.200S^{-0.007}$	29.200	0.007	0.955	0.204
		30—45	$\theta=34.901S^{-0.007}$	34.901	0.007	0.952	0.244
		45—60	$\theta=40.198S^{-0.009}$	40.198	0.009	0.954	0.362
		60—75	$\theta=37.452S^{-0.011}$	37.452	0.011	0.998	0.412
阴坡	人工林	0—15	$\theta=23.951S^{-0.007}$	23.951	0.007	0.987	0.168
		15—30	$\theta=22.449S^{-0.009}$	22.449	0.009	0.981	0.202
		30—45	$\theta=26.273S^{-0.010}$	26.273	0.010	0.931	0.263
		45—60	$\theta=24.168S^{-0.010}$	24.168	0.010	0.953	0.242
		60—75	$\theta=20.545S^{-0.01}$	20.545	0.012	0.915	0.247
阳坡	人工林	0—15	$\theta=31.168S^{-0.023}$	31.168	0.023	0.921	0.717
		15—30	$\theta=23.804S^{-0.026}$	23.804	0.026	0.990	0.619
		30—45	$\theta=26.577S^{-0.020}$	26.577	0.020	0.926	0.532
		45—60	$\theta=26.839S^{-0.020}$	26.839	0.020	0.971	0.537
		60—75	$\theta=24.591S^{-0.014}$	24.591	0.014	0.984	0.344

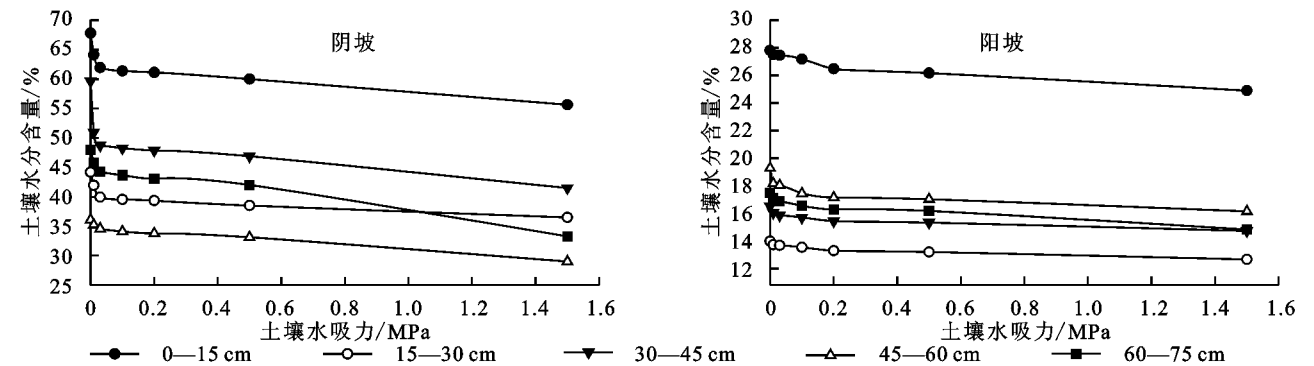
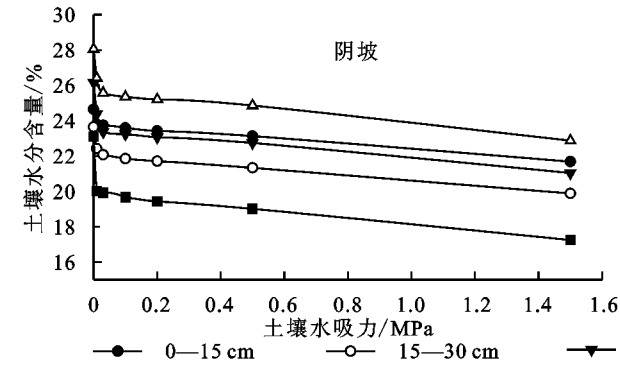


图 3 阳坡和阴坡天然林土壤水分特征

不同土壤吸力下土壤含水率代表不同基质势时土壤颗粒对水分的吸持能力,从图 3 和图 4 中可以看出,阴坡与阳坡天然林、人工林不同土层深度土壤水

分特征曲线具有相同的形状特点,即在低吸力段(0~0.1 MPa)曲线坡度较为陡直,在中高吸力段(0.1~1.5 MPa)曲线较为平缓,因此各个土层土壤持水能

力均是天然林阴坡达到最强。在低吸力段,表层(0—15 cm)土壤持水能力遵循:天然林阴坡>人工林阴坡>天然林阳坡>人工林阳坡,下层(15—75 cm)土壤持水能力遵循:天然林阴坡>人工林阴坡>人工林阳坡>天然林阳坡;在中高吸力段,表层(0—15 cm)土



壤持水能力遵循:天然林阴坡>天然林阳坡>人工林阴坡>人工林阳坡,土层(15—60 cm)土壤持水能力遵循:天然林阴坡>人工林阳坡>人工林阴坡>天然林阳坡,土层(60—75 cm)土壤持水能力遵循:天然林阴坡>人工林阴坡>人工林阳坡>天然林阳坡。

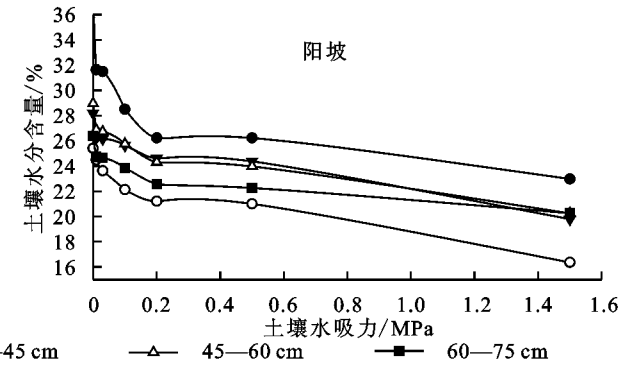


图4 阳坡和阴坡人工林土壤水分特征

在低吸力范围内,土壤所能保持和释放出的水量取决于土壤中较大孔隙分布,主要是毛管力起作用;在中高吸力段主要取决于土壤质地,主要是土壤颗粒的表面起吸附作用。当土壤水吸力相同时,天然林阴坡与阳坡5个土层深度的土壤含水量明显不同,且差别较为明显。具体表现为:阴坡和阳坡土壤持水能力从大到小分别为:0—15 cm>45—60 cm>60—75 cm>30—45 cm>15—30 cm和0—15 cm>30—45 cm>60—75 cm>15—30 cm>45—60 cm。阴坡和阳坡在各个压力下土壤含水量介于26%~65%及13%~30%。当土壤水吸力值相同时,人工林阴坡和土壤持水能力从大到小分别为:0—15 cm>45—60 cm>30—45 cm>60—75 cm>15—30 cm和45—60 cm>0—15 cm>30—45 cm>15—30 cm>60—75 cm。阴坡和阳坡在各个压力下土壤含水量介于16%~40%及17%~30%。

总体来说,在同一种林地类型中,不管是天然林还是人工林均是阴坡土壤持水能力优于阳坡;在同一坡向中,天然林阴坡土壤持水能力高于人工林,人工林阳坡土壤持水能力高于天然林;在所有测试土壤中,除人工林阳坡外,其他3种立地条件土壤持水能力均是上层(0—15 cm)高于下层(15—75 cm)。这主要与植被密切相关,阴坡林地植被茂盛,且有大量的凋落物归还林地,并分解较好,其土壤腐殖质多为熟腐殖质;再加之,天然林阴坡植被条件优于人工林,而人工林阳坡受到人为干扰的影响,上层土壤的有机质都高于下层,土壤孔隙状况和土壤结构得到了改善和提高^[12]。

2.1.2 不同剖面深度土壤比水容量 比水容量(即水分特征曲线斜率)表示单位吸力下单位质量土壤可储存的水量,是评价土壤供水能力及抗旱力的有效指标^[14],可反映出土壤可供给植物吸收水量多少,研究表明比水容量随土壤吸力的增大而减小,比水容量越大土壤供水

能力及抗旱力越强,但有效水供给能力愈差^[15]。

从表3可知,在不同土壤的不同吸力阶段, C_0 值的变化幅度不同,在0.001~0.02 MPa内,比水容量减小的幅度较大,其数量级从 $10^1 \rightarrow 10^{-1}$ 发生变化,说明土壤释出的水量比较多,土壤的供水性能较好;而在0.05~0.15 MPa时,土壤水吸力的数值保持在 10^{-2} 数量级范围内,说明随着土壤水吸力的增大,土壤释出的水量减少,土壤的供水性能相应减弱。阳坡人工林各剖面土壤 C_0 值均高于阴坡,天然林土壤在0.003~0.15 MPa时,30—45 cm土壤 C_0 值高于阴坡人工林;阳坡各剖面土壤 C_0 值均高于阴坡;阳坡和阴坡天然林和人工林的土层之间 C_0 值无明显排列顺序。

由于在同一吸力下,土壤比水容量主要随 ab 值而增大,所以 ab 值越大,说明土壤供水性能越好。根据表2中的参数数值,以 ab 作为评价参数,除阳坡人工林外,阴坡人工林、阳坡和阴坡自然林均为深层土壤 ab 值高于表层土壤,说明通过退耕还林的林树下线的土壤接近天然林特性,均为下层土壤供水能力优于表层;阳坡人工林表层土壤 ab 值高于深层土壤,主要由于在人为灌溉及套种等耕作措施下,有效改善了经济林表层土壤的供水能力。

2.2 土壤物理性质

土壤物理性质主要有颗粒组成、容重、含水率、孔隙度、非毛管孔隙度等指标。土壤颗粒组成越复杂,越易形成良好的土壤结构,土壤质地也越好;就森林土壤而言,土壤容重的大小与林分状况密切相关,这些指标直接影响着林地土壤的持水性能和蓄水能力;土壤孔隙是土壤水分、养分、空气和微生物的活动场地、迁移通道和贮存空间,土壤孔隙度包括毛管孔隙度、非毛管孔隙度和总毛管孔隙度3个部分,非毛管孔隙度占总毛管孔隙度的比例称之为“非占比”^[16]。

表 3 不同水吸力下土壤的比水容量(C_θ)

坡向	土壤类型	土层深度/cm	不同水吸力下的比水容量(C_θ)					
			0.001 MPa	0.003 MPa	0.01 MPa	0.02 MPa	0.05 MPa	0.15 MPa
阴坡	天然林	0—15	2.522	0.832	0.247	0.123	0.049	0.016
		15—30	1.504	0.497	0.148	0.073	0.029	0.010
		30—45	3.265	1.072	0.316	0.157	0.062	0.020
		45—60	1.809	0.596	0.176	0.088	0.035	0.011
		60—75	4.028	1.315	0.386	0.190	0.075	0.024
阳坡	天然林	0—15	4.513	1.493	0.444	0.221	0.088	0.029
		15—30	2.077	0.687	0.204	0.102	0.040	0.013
		30—45	2.483	0.821	0.244	0.122	0.048	0.016
		45—60	3.694	1.219	0.362	0.180	0.071	0.024
		60—75	4.225	1.392	0.412	0.204	0.081	0.027
阴坡	人工林	0—15	1.704	0.564	0.168	0.083	0.033	0.011
		15—30	2.063	0.681	0.202	0.100	0.040	0.013
		30—45	2.688	0.886	0.263	0.130	0.052	0.017
		45—60	2.473	0.815	0.242	0.120	0.048	0.016
		60—75	2.534	0.834	0.247	0.122	0.048	0.016
阳坡	人工林	0—15	7.559	2.457	0.717	0.353	0.138	0.045
		15—30	6.571	2.129	0.619	0.304	0.119	0.038
		30—45	5.566	1.815	0.532	0.262	0.103	0.034
		45—60	5.621	1.833	0.537	0.265	0.104	0.034
		60—75	3.556	1.167	0.344	0.170	0.067	0.022

2.2.1 土壤质地 岷江上游山区阳坡和阴坡的人工林和天然林均表现为土壤以粉粒最多,阳坡人工林和天然林粉粒平均含量分别为在 56.99%和 53.75%左右,阴坡人工林和天然林粉粒平均含量分别为在 40.66%和 52.85%左右。黏粒最少,阳坡人工林和天然林黏粒平均含量分别为在 14.23%和 15.54%,阴坡人工林和天然林黏粒平均含量分别为在 9.55%和 9.70%。砂粒居中,阳坡人工林和天然林砂粒平均含量分别为在 29.25%和 30.72%左右,阴坡人工林和天然林砂粒平均含量分别为在 39.78%和 37.45%左右。阳坡人工林和天然林各海拔段砂粒含量平均分别低于阴坡 26.47%和 17.97%;粉粒和黏粒含量阳坡人工林和天然林各海拔土壤平均含量分别高于阴坡 28.65%和 32.84%,1.67%和 37.585,这可能与海拔高度、成土母质和土壤发育程度有关^[17]。

阳坡和阴坡人工林砂粒含量随海拔升高而呈波动上升趋势,黏粒含量则呈现与砂粒相反的趋势;随着海拔高度的上升,阴坡土壤粉粒含量整体上是递减,而阳坡土壤粉粒含量是增加的趋势。这表明阳坡土壤的结构得到改良,土壤微生境得到改善,土壤保水能力增强。阳坡和阴坡人工林土壤容重随海拔升高而呈现先降低后升高的趋势。阳坡和阴坡天然林黏粒含量随海拔升高而先增高后降低,阴坡天然林土壤砂粒和粉粒随海拔变化呈现上下波动状态,而阳坡砂粒呈先降低后升高趋势,粉粒呈先升高后降低趋势。

2.2.2 容重 阴坡天然林和天然林土壤容重随海拔的升高而递增,介于 1.12~1.34 g/cm³,在整个海拔段

上呈先减后增的规律。在阳坡,海拔 2 550~2 610 m 内土壤容重随海拔的升高而增加,变化范围为 1.34~1.53 g/cm³;海拔 2 610~2 630 m 土壤容重有所下降,为 1.47 g/cm³,总体呈先增后减的规律。阴坡的土壤容重明显低于阳坡,造成这种差异的原因在于:阴坡植被茂盛,产生了大量的植物树叶及根系等残体,这些凋落物分解后回归土壤,再加之水分条件较好,分解较快,土壤有机质含量就越多,使得土壤容重下降;加之阳坡日照时间与强度大于阴坡,地表水分蒸发快,导致土壤结构紧实,容重变大^[16]。

2.2.3 孔隙度 阴坡天然林非毛管孔隙度和“非占比”均随海拔的升高呈先减—增—减—再增的变化趋势,而毛管孔隙度、总毛管孔隙度随海拔的升高呈先增—减—增—再减的变化特征。土壤总毛管孔隙度在 50%左右,说明其土壤的通气性、透水性和保水性较为协调,主要原因是阴坡森林土壤在茂密植物根系作用下变得更加疏松,再加之丰厚的枯枝落叶分解为腐殖质,增加了土壤孔隙度。阳坡天然林非毛管孔隙度和“非毛比”均随海拔的增加而递减;毛管孔隙度和总毛管孔隙度随海拔则表现出先减后增的趋势,其中,毛管孔隙度在海拔 2 570~2 590 m 最低(35.42%),总毛管孔隙度在海拔 2 590~2 610 m 最低(43.37%)。阳坡天然林与阴坡比较而言,非毛管孔隙度阴坡总体略高,而毛管孔隙度和总毛管孔隙度阳坡总体高于阴坡。

阴坡人工林非毛管孔隙度和“非占比”均随海拔的升高而升高,而毛管孔隙度、总毛管孔隙度随海拔的升高呈先增后减的变化特征,说明高海拔地区土壤

结构疏松,通气性好,蓄水能力较强,有利于植物的生长,这主要是因当地居民大力发展种植业,受人为干扰下非毛管孔隙度较小;而阳坡人工林非毛管孔隙度和“非占比”均随海拔的升高而降低,毛管孔隙度、总毛管孔隙度随海拔的升高而升高;阴坡非毛管孔隙度、毛管孔隙度和总毛管孔隙度总体高于阳坡。

2.3 土壤持水性的影响因素及其相关性分析

研究表明土壤持水性与土壤物理性质之间存在

着相互作用和相互影响,土壤水分受土壤物理性质和区域环境变化和植被类型的共同影响,进而影响着林树下线的空间移动^[6]。为研究林树下线土壤容重、毛管孔隙度、非毛管孔隙度及颗粒组成等物理性质对土壤的持水性的影响,对不同海拔高度和坡向林地,及相应海拔高度的未退还林土壤主要物理性指标与不同 0.001~0.15 MPa 吸力范围内的土壤含水率进行相关性分析,结果见表 5。

表 5 不同海拔高度林地土壤水分与土壤性质的相关性

土壤 水吸力/MPa	容重/ (g·cm ⁻³)	非毛管 孔隙度/%	毛管 孔隙度/%	总孔隙 度/%	砂粒 (2~0.05 mm)	粉粒 (0.05~0.002 mm)	黏粒 (<0.002 mm)
0.001	0.592	0.792*	0.294	0.375	0.104	0.127	0.870**
0.003	0.489	0.969**	0.307	0.282	0.113	0.141	0.809**
0.010	0.585	0.993**	0.380	0.343	0.106	0.126	0.907**
0.020	0.677*	0.970**	0.457	0.398	0.096	0.110	0.102
0.050	0.664*	0.978**	0.441	0.388	0.096	0.110	0.100
0.150	0.792*	0.863**	0.540*	0.409	0.083	0.087	0.113

注:(1) * 在 0.05 水平(双侧)上显著相关; ** 在 0.01 水平(双侧)上显著相关。

从表 5 可知,土壤中非毛管孔隙度、毛管孔隙度与土壤持水性在 0.001~0.150 MPa 整个水吸力范围内均存在正相关关系且相关性较高,当水吸力为 0.003~0.150 MPa 时,非毛管孔隙度相关系数达到极显著相关($p<0.01$);水吸力为 0.001 MPa 时,显著性达到显著,相关系数为 0.792;当水吸力为 0.150 MPa 时,毛管孔隙度与土壤持水性达到显著相关(0.540),表明非毛管孔隙度越大,土壤持水量就越大;要提高土壤的持水性,

必先改善土壤的孔隙结构。林地土壤持水性还与黏粒呈极显著正相关($p<0.01$)关系;在水吸力为 0.02~0.15 MPa 时,土壤持水性能与容重呈正相关关系($p<0.05$)。土壤容重、总孔隙度、砂粒、粉粒与土壤持水性之间在 0.001~0.150 MPa 整个水吸力范围内均没有显著相关性。总体来说,林树下线土壤持水性主要取决于土壤的质地(<0.002 mm 黏粒含量)、非毛管孔隙度,其次为土壤毛管孔隙度、总孔隙度和容重。

表 4 阴坡和阳坡、人工林和天然林地土壤物理性质

坡向	林地类型	海拔/m	颗粒组成/%			非毛管 孔隙度/%	毛管 孔隙度/%	总孔隙度/ %	容重/ (g·cm ⁻³)
			砂粒 (2~0.05 mm)	粉粒 (0.05~0.002 mm)	黏粒 (<0.002 mm)				
阴坡	人工林	1500~1700	42.05±3.19a	47.82±2.72a	10.13±0.86a	4.24±2.10a	45.64±1.97a	49.88±1.50a	1.38±0.10b
		1700~1900	51.68±2.49c	40.14±1.82c	8.19±0.69b	4.60±0.62c	46.42±1.93c	51.02±2.25a	1.28±0.08a
		1900~2100	47.86±3.40b	41.51±2.56b	10.63±0.85c	6.04±1.19ab	43.80±0.58b	49.84±1.27b	1.32±0.09a
		2100~2300	52.21±1.50bc	37.77±1.21bc	10.02±0.57d	6.64±1.78bc	36.83±1.97bcd	43.47±2.44d	1.41±0.08b
		2300~2500	55.13±1.17d	36.08±1.00cd	8.79±0.37d	8.08±0.53b	34.18±1.2abc	42.26±1.25c	1.55±0.12c
天然林	天然林	2200~2220	36.18±1.53b	55.14±1.21a	8.68±0.34a	5.04±0.77a	46.22±3.14a	51.26±3.78a	1.12±0.04a
		2220~2250	42.42±4.73b	48.14±3.86a	9.44±0.79a	3.82±0.54c	52.55±1.62a	56.37±1.93b	1.21±0.13a
		2250~2300	36.16±1.22b	53.57±1.10a	10.27±0.24a	4.85±0.53c	48.22±0.73a	52.88±1.08b	1.27±0.09a
		2300~2350	33.85±2.34a	55.68±1.61a	10.47±0.64a	4.11±0.36b	49.39±2.57a	53.49±2.70b	1.34±0.10b
		2350~2400	38.62±0.85b	51.74±0.76a	9.65±0.11a	6.34±0.56b	45.36±3.13a	51.70±3.49b	1.29±0.18b
天然林	天然林	2550~2570	31.60±6.03a	53.38±5.31a	15.03±1.72a	12.24±5.24a	36.93±3.53a	49.17±6.23a	1.34±0.06a
		2570~2590	28.56±6.81c	56.12±5.26c	15.32±1.89b	9.80±8.45c	35.42±6.83d	45.22±3.56b	1.49±0.09b
		2590~2610	29.78±3.82d	53.70±3.59d	16.52±1.80a	5.28±2.17b	37.94±5.23c	43.37±5.48c	1.53±0.09c
		2610~2630	32.94±6.00b	51.78±5.48b	15.28±1.41c	3.32±1.40a	41.09±5.94b	44.65±5.44d	1.47±0.06b
阳坡	人工林	1600~1800	26.89±0.50a	54.54±2.41a	15.20±1.72a	4.98±0.21c	37.41±1.87a	41.85±1.03b	1.34±0.05b
		1800~2000	28.90±0.33a	58.40±1.17a	14.55±1.39a	3.87±0.47b	39.36±2.11a	45.89±1.11b	1.24±0.03c
		2000~2200	27.79±0.55a	57.22±1.33a	14.57±1.12a	3.55±0.77a	42.11±1.04b	44.39±2.10a	1.19±0.06b
		2200~2400	33.42±0.43a	57.83±1.66a	12.61±2.38a	3.24±0.69a	44.55±1.25b	48.12±2.47a	1.41±0.04a

注:表中的小写字母 a,b,c,d 代表 0.05 水平的差异显著性。

3 结论

(1) 利用压力膜仪测得不同吸力水平下的土壤重量含水量,运用 Gardner 模型的经验方程拟合得出不同坡向和海拔高度的土壤水分特征曲线。阴坡与阳坡天然林、人工林不同土层深度土壤水分特征曲线具有相同的形状特点,整体随着土壤基质势的增加,持水曲线呈现逐渐下降的趋势,到一定的吸力后,土壤持水曲线趋于平缓。

(2) 通过不同拟合参数来分析林树下线土壤的持水能力,可知当评价参数不同时,最终所得到的供试土壤持水能力排序也有差异。整体而言,同一种林地类型中,天然林和人工林均是阴坡土壤持水能力优于阳坡;同一坡向中,天然林阴坡土壤持水能力高于人工林;除人工林阳坡外,天然林阳坡和阴坡、人工林阴坡土壤持水能力均是表层优于下层。

(3) 土壤物理性质方面,岷江上游山区林地土壤以粉粒最多,黏粒最少,砂粒居中,且阳坡林地砂粒含量低于阴坡,粉粒和黏粒含量高于阴坡;阴坡林地土壤容重随海拔的升高而递增,阳坡林地土壤容重随海拔的升高而呈先增后减的规律,阴坡的土壤容重明显低于阳坡;林地土壤孔隙度结构总体阴坡优于阳坡,阴坡植被茂盛,凋落物丰沛,再加之水分条件较好,使得土壤容重下降,并有效改善了土壤的孔隙结构,使土壤通气和透水能力增强。

(4) 通过土壤持水性与土壤物理性质相关性的研究发现:林树下线土壤持水性与黏粒和非毛管孔隙度呈极显著正相关,与毛管孔隙度和容重呈显著正相关,说明黏粒的含量越高,容重越大时,土壤孔隙结构越好,土壤水分含量越好,越有利于植被恢复的进行。

林树下线土壤水分的变化影响着林树下线的空间位移,林树下线的移动是受土壤水分的变化而进行变化的。因此,在当地进行植被恢复过程中,首先要考虑的就是土壤水分问题,应当从高海拔交错带逐步向下进行,充分利用其土壤水分条件逐渐向下推移起到林树下线下移和抑制干旱河谷上延的作用,最终达到岷江上游干旱河谷困难地段的植被恢复可以顺利进行的目的。

参考文献:

[1] 刘效东,乔玉娜,周国逸.土壤有机质对土壤水分保持及其有效性的控制作用[J].植物生态学报,2011,35(12):

1209-1218.

- [2] Ursino N, Contarini S. Stability of banded vegetation patterns under seasonal rainfall and limited soil moisture storage capacity[J]. *Advances in Water Resources*, 2006,29(10):1556-1564.
- [3] 翟真,王青.岷江上游林树下线地理分布格局及其空间移动特征[J].地理研究,2015,34(11):2105-2111.
- [4] 唐香君,樊敏,赵丽,等.岷江上游干旱河谷区林—农—草地土壤水分特征与数值模拟[J].中国农学通报,2017,33(7):128-133.
- [5] 蒋勇军,王青,俞音,等.岷江上游杂谷脑河流域农业综合生产潜力研究[J].江苏农业科学,2012,40(4):419-421.
- [6] 唐香君.岷江上游杂谷脑河流域林树下线土壤水分研究[D].四川绵阳:西南科技大学,2017.
- [7] 鲁如坤.土壤农业化学分析方法[M].北京:中国农业科技出版社,2000.
- [8] Genuchten M T V. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1980,44(44):892-898.
- [9] 刘小宁,隆瑞红,罗珠珠,等.甘肃省典型土壤持水特性及影响因素研究[J].干旱地区农业研究,2017,35(1):143-151.
- [10] 姚其华,邓银霞.土壤水分特征曲线模型及其预测方法的研究进展[J].土壤通报,1992,23(3):142-144.
- [11] 刘恩斌,董水丽.黄土高原主要土壤持水性能及抗旱性的评价[J].水土保持通报,1997,17(7):21-26.
- [12] 窦建德,王绪芳,熊伟,等.宁夏六盘山北侧 5 种典型植被的土壤持水性能研究[J].林业科学研究,2006,19(3):301-306.
- [13] 吴文强,李吉跃,张志明,等.北京西山地区人工林土壤水分特性的研究[J].北京林业大学学报,2002,24(4):51-55.
- [14] 马爱生,刘思春,吕家珑,等.黄土高原地区几种土壤的水分状况与能量水平[J].西北农林科技大学学报:自然科学版,2005,33(11):117-120.
- [15] Diiwu J Y, Rudra R P, Dickinson W T, et al. Tillage and heterogeneity effects on the performance of soil water characteristic models[J]. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 1998,71(3):307-313.
- [16] 李红,范素芳,张光灿,等.黄土丘陵区退耕还林后不同林地土壤孔隙与贮水特性[J].水土保持通报,2010,30(1):27-30.
- [17] 程光庆.渭北旱塬区土地利用类型及坡向对土壤质量的影响[D].陕西杨凌:西北农林科技大学,2016.