

文章编号: 1008-2786-(2018)3-364-08

DOI:10.16089/j.cnki.1008-2786.000332

晋西黄土区不同林地类型对土壤水分特性的影响

霍嘉仪¹, 陈丽华^{1,2*}, 及金楠¹, 瞿文斌¹

(1 北京林业大学 水土保持学院, 北京 100083; 2. 山西吉县森林生态系统国家野外科学观测研究站, 山西 吉县 042200)

摘 要: 为揭示晋西黄土区典型人工林土壤水分特征, 本研究以刺槐林(*Robinia pseudoacacia*)、油松林(*Pinus tabulaeformis*)、丁香林(*Syzgium aromaticum*)和裸地为研究对象, 分析其土壤含水量、土壤水分特征曲线和土壤入渗速率。研究结果表明: (1) 丁香林的土壤水分情况优于油松林地, 刺槐林地的土壤水分状况最差, 并且在 80 cm 处出现明显的土壤干层。(2) 不同土层土壤水分特征曲线整体趋势均表现为快速下降-缓慢下降-基本平稳。丁香地土壤持水能力优于乔木林地, 裸地土壤持水能力最差。(3) 不同林分初始入渗速率、稳定入渗速率均表现为: 丁香 > 刺槐 > 油松 > 裸地。Kostiakov、Philip 和 Horton 模型对黄土区土壤水分入渗拟合效果均较好。综上, 不同林分土壤水分特性差异较大, 灌木林地的土壤水分特性要优于乔木林地, 灌木林地更适合黄土区的自然条件, 黄土区植被建设应该重视灌木种植, 合理控制乔木林的种植范围。

关键词: 山西; 黄土区; 土壤含水量; 土壤水分特征曲线; 入渗速率

中图分类号: S715.3

文献标志码: A

土壤含水量、土壤水分特征曲线和土壤入渗速率是表征土壤水分特性的重要指标, 对土壤水分特性进行分析, 是评价土壤水分保持和涵养的基础^[1]。土壤入渗能力决定了降水再分配过程中地表径流和土壤储水能力大小, 土壤渗透性能越好, 降雨产生的地表径流越少^[2]。初始入渗速率、稳定入渗速率都能很好地表征土壤渗透能力^[3,4]。土壤水分特征曲线(SWCC)表示土壤水的能量和数量之间的关系, 其主要受土壤质地、土壤孔隙度等的影响, 可以间接反映土壤孔隙分布^[5,6]。通过土壤水分特征曲线可以了解土壤的持水性、土壤水分有效性, 可以对土壤水分进行定量分析。

为治理水土流失, 改善生态环境, 近年来黄土地区开展了大量的水土流失治理和植被恢复重建工作^[7]。但在重建过程中没有充分考虑该区土壤水

资源条件和降水条件, 水土保持林地过量地消耗土壤中的水分^[8]。而黄土区地下水埋藏深, 地下水不能及时供给, 导致很多地区出现了土地退化和“小老树”等现象^[9]。针对植物耗水与当地自然条件这一突出矛盾, 利用土壤水分特征曲线和土壤入渗性能, 明确土壤持水与植物耗水之间的关系, 可以为合理、有效地利用土壤水资源提供科学依据。目前, 国内外学者对黄土区土壤水分进行了大量研究, 但大都集中在对土壤水分时空分布以及土壤干层的研究上^[10,11], 并没有结合土壤入渗能力和土壤水分特征曲线对土壤水分特性进行综合分析。为此, 本文对林地土壤水分进行实时观测, 并且结合林地入渗能力和土壤持水能力, 明确土壤水分运动规律, 以期合理、有效地利用土壤水资源, 保证林草植被生理用水和提高林地水土保持功能提供依据。

收稿日期(Received date): 2017-12-25; 改回日期(Accepted date): 2018-05-29

基金项目(Foundation item): 国家重点研发计划项目(2016YFC0501704)。[National Key Research and Development Program of China (2016YFC0501704)]

作者简介(Biography): 霍嘉仪(1994-), 女, 山西吕梁人, 硕士研究生, 主要从事林业生态工程方面的研究。[HUO Jiayi (1994-), female, born in Luliang, Shanxi Province, M. Sc. candidate, research on forestry ecological engineering] E-mail: 490560679@qq.com

* 通讯作者(Corresponding author): 陈丽华(1957-), 女, 博士, 教授, 主要从事林业生态工程方面的研究。[CHEN Lihua (1957-), female, Ph. D., professor, research on forestry ecological engineering] E-mail: c-lihua@bjfu.edu.cn

1 研究区域与方法

1.1 研究区域概况

研究区位于山西吉县蔡家川流域,地理坐标为110°39′45″ ~ 110°47′45″E,36°14′27″ ~ 36°18′23″N。研究流域属晋西黄土残塬沟壑区,流域面积为38 km²,走向为自西向东,长约14 km,海拔900 ~ 1513 m。年均气温10 ℃。年降水量575.9 mm,6—9月的降水量占全年的70%左右。年均水面蒸发量1732.9 mm,蒸发量远大于降水量,使得土壤水分成为限制该区植被生长的重要条件。研究区土壤均为褐土、黄土母质,土壤质地均匀^[12]。研究区人工植被主要为刺槐(*Robinia pseudoacacia*)、油松(*Pinus tabulaeformis*)、侧柏(*Platycladus orientalis*)等树种组成的纯林或混交林。林下植被主要为华北紫丁香(*Syringa oblata*)、连翘(*Forsythia suspensa*)、黄刺玫(*Rosa xanthina*)、三裂绣线菊(*Spiraea trilobata*)、胡

枝子(*Lespedeza bicolor Turcz*)等灌木。
在样地调查的基础上,选择立地条件一致的刺槐林、油松林、丁香林作为研究对象,不同类型林分的分布位置见图1。在所选林地内均设置20 m × 20 m的标准样方,对样方的土壤水分特性(土壤含水量、土壤水分特征曲线和土壤入渗速率)进行分析测定。样地基本情况见表1。

1.2 研究方法

1.2.1 土壤含水量的测定

分别在三块样地的中心位置布设土壤水分观测点,于2017年9月,采用WaterScout SM 100 Sensor-6 ft水分探头对油松、刺槐、丁香样地0 ~ 20 cm、20 ~ 40 cm、40 ~ 60 cm、60 ~ 80 cm、80 ~ 100 cm、100 ~ 130 cm土层土壤水分进行实时监测,数据输出频率为30 min/次,数据收集在数据采集仪中(WatchDog 1000 Series, Spectrum Technologies, USA),通过SpecWare 9软件对数据进行下载。

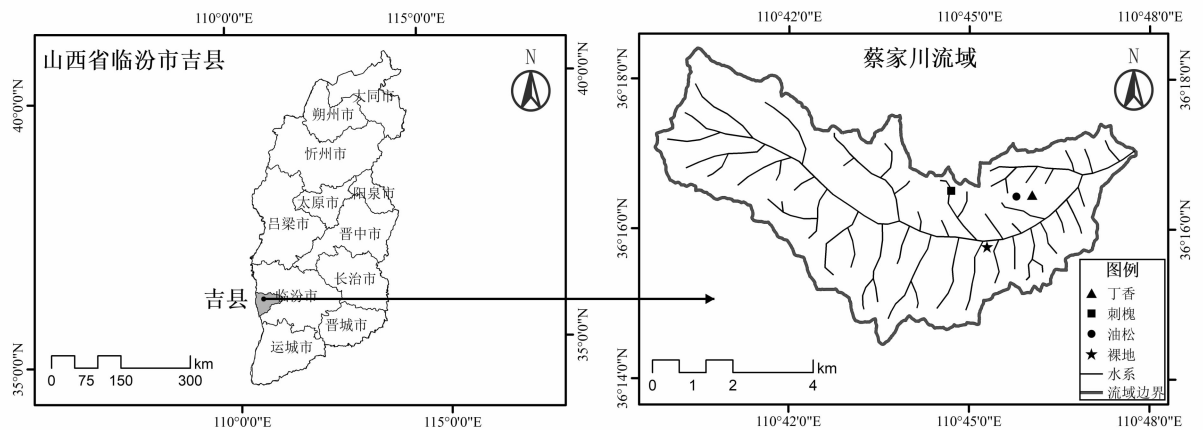


图1 研究区位置图

Fig. 1 The location of study area

表1 研究样地概况

Tab. 1 General situation of sample plots

样地 类型	林龄 /a	平均胸径 (地径)/cm	平均树高 /m	郁闭度 (覆盖度)/%	密度/ (株/hm ²)	坡度/ (/°)	坡向	海拔 /m
刺槐	26	10.17	9.45	70	2500	20°	阳坡	1180
油松	26	8.21	8.56	70	2200	19°	阳坡	1090
丁香	26	3.13	2.15	95	1700	16°	阳坡	1100
裸地	/	/	/	/	/	17°	阳坡	1052

1.2.2 土壤水分特征曲线的测定

在每块样地的坡上、坡中、坡下各挖取 1 个土壤剖面,分别用离心机配套的专用环刀对其 0 ~ 20 cm、20 ~ 40 cm、40 ~ 60 cm、60 ~ 80 cm 处的原状土进行采集,每层重复 3 次。将取好的土壤样品带回实验室,以备土壤水分特征曲线的测定。

将取回的装有土样的专用环刀置于盆中,先加水浸泡 24 h(此时土壤水分达到饱和状态),再在 20 °C 恒温条件下,分别设定土壤离心机(H-1400PF, KOKUSAN, Japan)转速为 100, 300, 500, 700, 1000, 2000, 5000, 7000 r/min,将土样离心 60 min 至平衡状态。离心结束后,将土样放入 105 °C 的烘箱烘干 12 h 至土壤恒重,测定烘干土壤质量。记录不同转速下土壤质量以及土壤收缩量,用于计算不同转速对应的土壤含水量和土壤水势。

土壤吸力计算公式为:

$$H = 1.3975 \times 10^{-6} \times n^2 \times (r - L - n) \times (3r + L + h) \quad (1)$$

式中: H 为设定转速下对应的土壤吸力值(cm); n 为转速(R/min); r 为离心机轴心到土壤样品中心的距离(cm); L 为离心机轴心到土壤样品顶部的距离(cm); h 为每次离心土壤样品下降高度(cm)。

1.2.3 土壤入渗速率的测定

土壤入渗速率的测定采用双环入渗法。双环内环直径为 16 cm,外环直径为 30 cm,高为 18 cm。在选定的样地的坡上、坡中、坡下各选择 3 个样点进行双环入渗实验。先将内外环打入土中 5 cm,采用人工定水头方法向内外环供水,分别在 0.5, 1, 3, 5, 7, 10, 15, 20, 25, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90 min 时读取量筒内下降水量。内外环水量始终保持在 5 cm 深度,每次入渗时间均持续 90 min,此时黄土已经达到稳渗状态。记录各时段入渗水量,用于土壤入渗速率的计算。

1.3 数据处理

采用以下 3 个模型对土壤入渗过程进行拟合。

(1) Kostiakov 模型

$$f(t) = at^{-b} \quad (2)$$

式中: $f(t)$ 为土壤入渗速率(mm/min); t 为入渗时间(min); a, b 为模型参数。

(2) Philip 模型

$$f(t) = 0.5St^{-\frac{1}{2}} + f_c \quad (3)$$

式中: S 为模型参数,表示土壤入渗能力的强弱; f_c 为稳渗率(mm/min)。

(3) Horton 模型

$$f(t) = f_c + (f_0 - f_c)e^{-kt} \quad (4)$$

式中: f_0 为初渗率(mm/min)。 k 为衰减指数,值越大表示土壤入渗衰减的越快。

用 Origin 软件对数据进行处理与作图。

2 结果与分析

2.1 不同林地类型土壤含水量的垂直分布

图 2 为刺槐、油松、丁香地 9 月份 0 ~ 130 cm 土层中各层的平均含水量随深度的变化图。从图 2 可见,0 ~ 130 cm 土壤含水量整体表现为丁香 > 油松 > 刺槐。三种林地表层土壤含水量相差不大,介于 10% ~ 15% 之间。刺槐林地在 0 ~ 80 cm 土层中土壤含水量逐渐减少,80 cm 土层含水量最低,为 5.93%,随后土壤含水量又逐渐增大。油松林的土壤水分变化整体呈现出随土层深度的增加土壤含水量变大的趋势,但变化幅度较刺槐和丁香地小,其在 100 cm 附近土壤含水量最小。丁香林土壤水分呈现出先增大后减小的趋势,最大值出现在 60 cm 土层中,为 31.16%。在 130 cm 处,三个样地的土壤含水量相差不大,均介于 10% ~ 20% 之间。

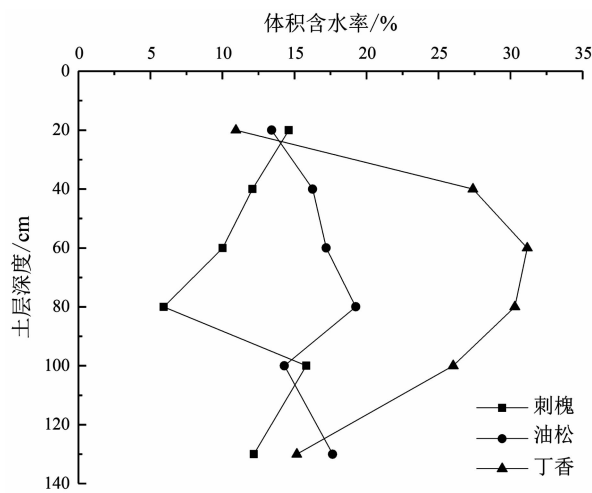


图 2 不同林地类型土壤含水量垂直变化

Fig. 2 Vertical variation of soil moisture in different wood land types

2.2 不同林地类型土壤水分特征曲线的变化规律

从图 3 可以看出,四种林地类型的土壤水分特征曲线趋势大致相同,均表现为“快速下降-缓慢下降-基本平稳”的变化趋势。土壤持水能力大小为:丁香 > 油松 > 刺槐 > 裸地。在 0 ~ 80 cm 土层中,裸地的土壤水分特征曲线均在林地下方,说明林

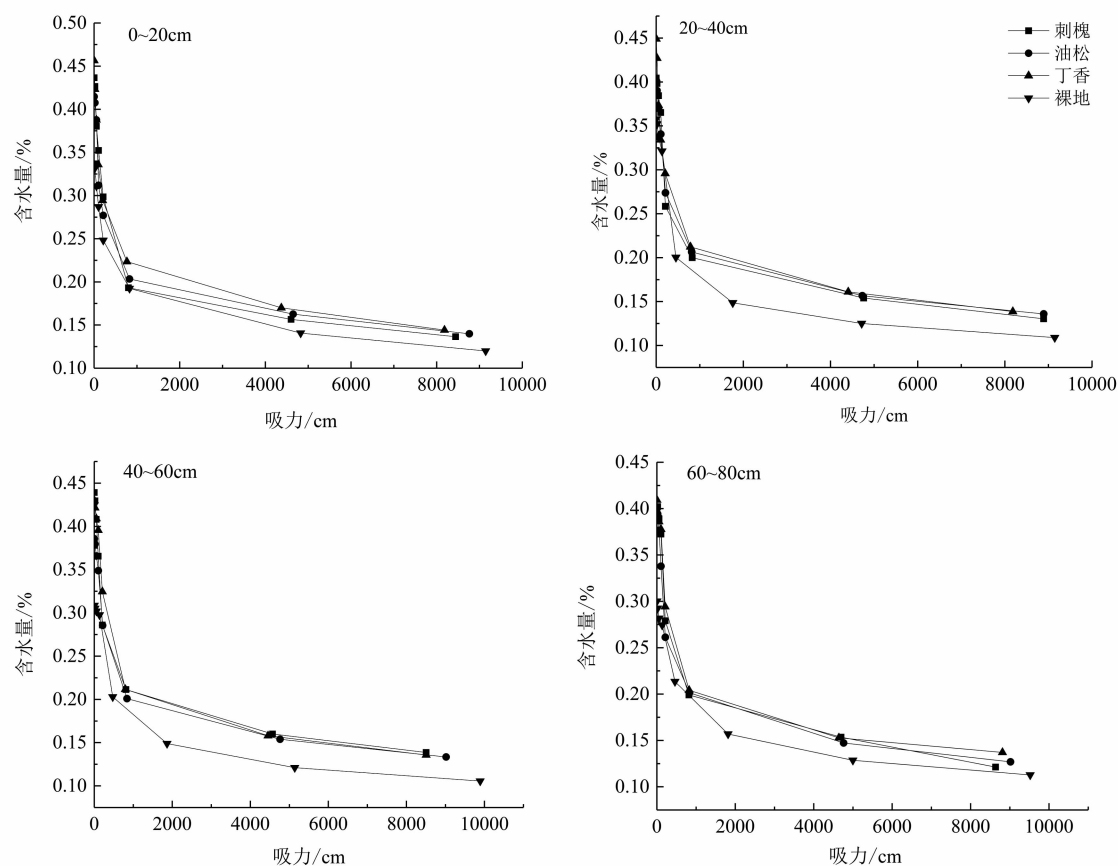


图3 不同林地类型土壤水分特征曲线

Fig. 3 Soil moisture characteristic curve of different wood land types

地的土壤持水能力比裸地强。在低吸力段(<1000 cm)的范围内,土壤水分特征曲线比较陡直,只要对土壤施加较小的吸力,大孔隙中的水就会被排出,这个范围内土壤所释放出的水主要是重力水。在高吸力段(>1000 cm)的范围内,土壤水分特征曲线逐渐趋于平缓,即使对土壤施加较大吸力,土壤含水量变化也不是很剧烈,该阶段释放出的水主要是土壤颗粒及细小毛管吸附的水。四种林地除表层土壤($0\sim20$ cm)的土壤水分特征曲线有明显差别,其余土层土壤水分特征曲线无明显差异。土壤水分特征曲线在各土层中均表现出在中低吸力段差异明显,在高吸力段无明显差异。由图3($0\sim20$ cm)可以看出,不同林地类型对土壤水分特征曲线有一定影响。相同吸力下,土壤含水量表现为:丁香 $>$ 油松 $>$ 刺槐 $>$ 裸地,这一规律在其余三个土层也有所体现,但是随着深度增加,差异越小。这说明灌木植被土壤的持水和蓄水能力的改善要优于乔木林地,裸地土壤持水能力最差。

2.3 不同林地类型土壤入渗速率的变化规律

由图4可以看出,四种林地土壤入渗速率均表

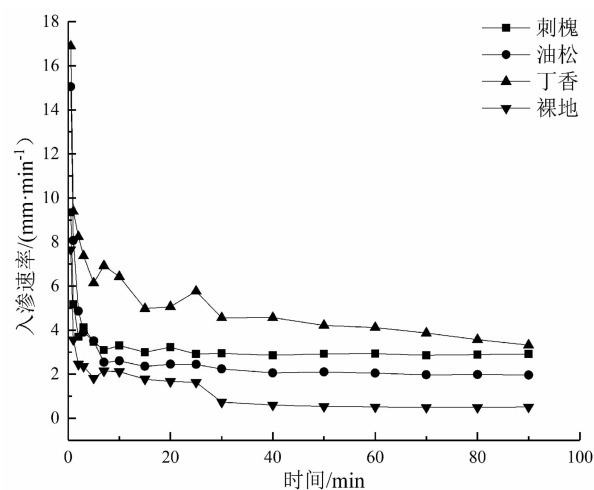


图4 不同林地类型土壤入渗速率变化

Fig. 4 Soil infiltration rate in different types of wood land

现为急速下降-趋于平稳的变化趋势。入渗速率的大小为:丁香 $>$ 刺槐 $>$ 油松 $>$ 裸地,这说明灌木林地的土壤渗透性能明显高于乔木林地和裸地。初渗速率越高,达到稳渗的时间越长,刺槐、油松、裸地达到稳渗的时间均在30 min左右,而丁香地30 min以后

表 2 四种林地类型土壤入渗方程模拟结果
Tab. 2 Modeling results of soil infiltration for four wood land types

植被类型	Kostiakov 模型参数			Philip 模型参数			Horton 模型参数			
	a	b	R^2	S	f_c	R^2	f_c	F_o	k	R^2
刺槐	6.09	0.23	0.69	8.09	2.09	0.85	3.11	19.99	2.01	0.95
油松	9.27	0.53	0.90	17.44	0.34	0.91	2.40	25.13	1.23	0.97
丁香	11.62	0.29	0.88	17.22	2.93	0.93	4.97	23.03	1.00	0.84
裸地	4.72	0.51	0.89	9.18	0.08	0.90	1.24	14.17	1.47	0.82

渗透速率还在缓慢下降,但渗透速率始终高于刺槐、油松和裸地,丁香地的稳渗速率是裸地的 7.25 倍,油松的 2.11 倍,刺槐的 1.39 倍。丁香地平均入渗速率和渗透总量都大于刺槐和油松,这说明灌木地土壤渗透性能优于乔木林地。从表 2 可以看出,三种模型的拟合效果均较好,能够很好的描述土壤渗透速率与时间的关系。丁香地的 a 值最大, b 值最小,说明丁香地的土壤入渗能力最大。Horton 模型对油松和刺槐地的拟合效果更好,而对丁香地的拟合效果较差。Philip 模型对丁香地和裸地实测渗透数据拟合效果较好,Kostiakov 模型对刺槐地的拟合效果最差。

3 讨论

3.1 土壤水分垂直变化分析

本研究发现,刺槐林土壤在 80 cm 处出现了土壤干层现象,这是因为刺槐植物根系主要分布在 0 ~ 80 cm 土层^[13],并依靠根系在水平方向上扩展来吸收水分。且该样地刺槐种植密度过大(株/hm²;表 1),根系大量消耗深层土壤的水分,降水不能满足刺槐地的蒸发蒸腾需要,加之黄土区地下水埋藏深,地下水不能及时供给土壤水分,导致该地出现了“小老树”的现象。穆兴民等^[14]在黄土高原人工林对区域深层土壤水环境影响研究中发现,人工林大量耗水形成的难以恢复的土壤干层是黄土高原特殊的生态水文现象。常译方等^[15~19]对黄土区土壤水分的研究中发现,土壤干层与人工林的树龄和植被种类等密切相关,高密度刺槐林对土壤水分的消耗远大于低密度刺槐林。本研究中,丁香林的土壤水分状况较好,在 0 ~ 130 cm 并未出现土壤干层现象。Chen 等^[20]在黄土高原不同景观恢复对土壤水分利用影响研究中发现,相比于其他土地覆盖类型,种植

灌木有助于保留更多的土壤水分,这与本研究的结果相一致。油松林地 0 ~ 80 cm 土壤水分变化幅度不大,根据对样地的实地踏查,这可能是因为油松林地地下几乎没有灌草植被,地表枯落物厚,可以有效减少土壤蒸发,改善土壤理化性质^[21],提高林地蓄水保土能力。而枯落物对土壤含水量的影响还需要进一步实验确定。丁香地植被覆盖度高,灌木的耗水比乔木小,而且土壤质地疏松^[22],降雨更多的渗入土壤,产生的径流少,所以丁香地在 0 ~ 130 cm 土壤中土壤水分含量整体较刺槐和油松地高。今后,还应该结合林地土壤理化性质、地表枯落物、土壤中根系生物量等因素对林地土壤水分特性做出系统的评价。

3.2 土壤水分特征曲线测定

土壤水分特征曲线受多种因素影响,其中土壤质地和土壤孔隙度影响最为显著^[23]。目前大多数土壤水分特征曲线的测定都是采用重塑土^[24],没有考虑土壤孔隙度对测定结果的影响。而本研究采用原状土来测定土壤水分特征曲线,测定结果更能代表实际情况。

离心机法测定土壤水分特征曲线要充分考虑压力对土壤收缩变化的影响,土壤持水特征测定中的几何收缩变化可用对数函数来描述^[25]。宁婷等^[26]对黄土丘陵区撂荒坡地土壤水分特征曲线的研究表明,土壤表层的土壤水分特征曲线差异比深层土壤的差异明显,这与本研究结果一致。由图 3 可以看出,本实验土壤水分特征曲线只在低吸力段差异明显,而在高吸力段各土层土壤水分特征曲线没有较大差异,这可能是因为环刀中土壤随着离心机转速的增加,土壤逐渐被压实,土壤容重增加,而土壤水分特征曲线主要受土壤质地和土壤孔隙度影响。这与邢旭光等^[27]的研究结果一致,但对于土壤离心机对土壤水分特征曲线的影响还需要进一步的实验。

3.3 土壤入渗速率差异分析

从图4可以看出,灌木林地的土壤入渗性能大于乔木林地,这是因为灌木林地地面植被丰富,覆盖度高,根系发达,土质疏松。而刺槐地面生长的大多是草本植物,而且草本植物覆盖度不高。油松地面几乎没有灌草植被生长。席彩云等^[28]对北京密云山区典型林地土壤入渗特性研究得出,四种典型林地土壤稳渗率顺序为灌木林地>刺槐林地>针阔混交林地>侧柏林地。党宏忠等^[29]在祁连山水源涵养林土壤水文特征研究中表明,灌木林的土壤入渗率大于乔木林,这与本研究结果一致。而高婵婵等^[30]在黑河上游天老池流域的研究表明,土壤入渗速率表现为乔木林地>灌木林地>草地,与本研究结果不一致。这可能是由于研究区内的植物生长状况不同,土壤理化性质有所差异,导致土壤入渗速率结果不一致。图4的入渗速率曲线在下降过程中会出现突然增加的现象,这可能与植物根系形成的大孔隙以及土壤中虫洞有关。Mei等^[31]研究发现,优先流为干旱半干旱地区深层土壤水分补充提供重要途径。入渗过程中入渗速率的突然增大还需要进一步的实验来解释这一现象。

土壤水分运动过程中水分的数量和能量是影响植物生长的重要因素。Wang^[32]在黄土高原不同土地覆盖类型对土壤水分动态变化响应研究中发现,灌木林下的土壤比其他类型下的土壤能够更有效地获得和保留土壤水分,土壤覆盖类型由初始含水量决定。本研究中,丁香林土壤入渗速率最高,土壤含水量也优于其他林地。由图3可知,相同吸力下,丁香林土壤含水量最高。不同林地的土壤含水量与土壤水分特征曲线具有一致性,均表现为:丁香>油松>刺槐>裸地。但本文没有从土壤水分运动机理上对此现象作出解释,还需要今后进一步实验。

4 结论

(1)三种林地的土壤水分状况为:丁香>油松>刺槐。灌木林地的土壤水分状况优于乔木林地。刺槐和油松林地分别在80 cm和100 cm处出现了土壤干层现象,尤其刺槐地最为明显。因此,在干旱少雨的黄土高原进行植被恢复与重建时,应该合理控制高大乔木的种植密度,采用灌草结合的结构配置,形成能与当地降水资源相协调的合理密度,是防止人工林过度耗水形成土壤干层的关键,也是水土

保持措施持续提升技术的关键。

(2)土壤持水能力大小为:丁香>油松>刺槐>裸地。不同土层土壤水分特征曲线整体趋势均表现为快速下降-缓慢下降-基本平稳。植被可以有效地提高土壤持水能力,灌木林地持水能力比乔木林地高。另外,本研究采用离心机法测定土壤水分特征曲线,随着转速的增加,土壤不断被压实,土壤容重发生变化,离心机对土壤的压实效应不可忽略^[33]。

(3)四种林地的入渗速率差异明显,初始入渗速率、稳定入渗速率、平均入渗速率均表现为:丁香>刺槐>油松>裸地。三个入渗模型均能很好的描述土壤入渗速率与时间的关系。Kostiakov、Philip和Horton模型对黄土区土壤水分入渗拟合效果均较好。

通过对四种典型林地的土壤水分、土壤水分特征曲线、土壤入渗特性的综合分析表明:灌木林地土壤水分特性整体优于乔木林地,灌草地更适合黄土区的自然条件,乔木林地植物种植密度过大,植物根系过度消耗土壤中的水分,出现土壤干层现象。土壤孔隙度小,入渗速率低,降水不能及时渗入土壤。灌木林地土壤渗透性和持水性都比较好。对此,在黄土区的植被建设中,应该重视灌木林地,对耗水量大的乔木林地对其密度进行调整,控制其耗水量,保证其正常生长,实现水土保持措施可持续发展。

参考文献(References)

- [1] 史小红,樊才睿,李畅游,等. 呼伦贝尔草原不同放牧草场土壤水文特性研究[J]. 水土保持学报, 2015, 29(2): 145-214 [SHI Xiaohong, FAN Cairui, LI Changyou, et al. Soil hydrological characteristics of different grazing system grassland in Hulun-Beier [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2015, 29(2): 145-214]
- [2] 王翠萍,廖超英,孙长忠,等. 黄土地表生物结皮对土壤贮水性能及水分入渗特征的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2009, 27(4): 54-59 [WANG Cuiping, LIAO Chaoying, SUN Changzhong, et al. Effect of biological soil crusts on soil water storage capability and permeability in loess area [J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2009, 27(4): 54-59]
- [3] 李卓,刘永红,杨勤. 土壤水分入渗影响机制研究综述[J]. 灌溉排水学报, 2011, 30(5): 124-130 [LI Zhuo, LIU Yonghong, YANG Qin. Review on effects mechanism of soil water infiltration [J]. Journal of Irrigation Drainage, 2011, 30(5): 124-130]
- [4] 郭忠升,邵明安. 半干旱区人工林地土壤入渗过程分析[J]. 土壤学报, 2009, 46(5): 953-958 [GUO Zhongsheng, SHAO Mingan. Soil water infiltrating process in afforested land on slopes of

- the semiarid region of Loess Plateau [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2009, **46**(5): 953–958]
- [5] 来剑斌,王全九. 土壤水分特征曲线模型比较分析[J]. 水土保持学报,2003,**17**(1):137–140 [LAI Jianbin, WANG Quanjui. Comparison of soil water retention curve model [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2003, **17**(1): 137–140]
- [6] 孙迪,夏静芳,关德新,等. 长白山阔叶红松林不同深度土壤水分特征曲线[J]. 应用生态学报,2010,**21**(6):1405–1409 [SUN Di, XIA Jingfang, GUAN Dexin, et al. Soil water characteristic curves at different soil depths in a broad-leaved Korean pine forest in Changbai Mountains. [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2010, **21**(6):1405–1409]
- [7] 杨文治. 黄土高原土壤水资源与植树造林[J]. 自然资源学报, 2011,**16**(5):433–438 [YANG Wenzhi. Soil water resources and afforestation in Loess Plateau [J]. *Journal of Natural Resources*, 2011, **16**(5): 433–438]
- [8] 邵明安,贾小旭,王云强,等. 黄土高原土壤干层研究进展与展望[J]. 地球科学进展,2016,**31**(1):14–22 [SHAO Mingan, JIA Xiaoxu, WANG Yunqiang, et al. A review of studies on dried soil layers in the Loess Plateau [J]. *Advances in Earth Science*, 2016, **31**(1): 14–22]
- [9] CHEN H, SHAO M, LI Y. Soil desiccation in the Loess Plateau of China [J]. *Geoderma*, 2008, **143**(1): 91–100
- [10] FU B, WANG J, CHEN L, et al. The effect of land use on soil moisture variation in the Danangou catchment of the Loess Plateau, China [J]. *Catena*, 2003, **54**(1–2): 197–213
- [11] CHEN L, HUANG Z, GONG J, et al. The effect of land cover/vegetation on soil water dynamic in the hilly area of the loess plateau, China [J]. *Catena*, 2007, **70**(2): 200–208
- [12] 李民义,张建军,王春香,等. 晋西黄土区不同土地利用方式对土壤物理性质的影响[J]. 水土保持学报,2013,**27**(3):125–131 [LI Minyi, ZHANG Jianjun, WANG Chunxiang, et al. Effects of land use types on soil physical properties in Loess Plateau of Western Shanxi [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2013, **27**(3): 125–131]
- [13] 刘秀萍,陈丽华,陈吉虎. 刺槐和油松根系密度分布特征研究[J]. 干旱区研究,2007,**24**(5):647–651 [LIU Xiuping, CHEN Lihua, CHEN Jihu. Study on the Distribution of root density of *Robinia pseudoacacia* L and *Pinus tabulaeformis* Carr [J]. *Arid Zone Research*, 2007, **24**(5): 647–651]
- [14] 穆兴民,许学选,王文龙,等. 黄土高原人工林对区域深层土壤水环境影响[J]. 土壤学报,2003,**40**(2):210–217 [MU Xingmin, XU Xuexuan, WANG Wenlong, et al. Impact of artificial forest on soil moisture of the deep soil layer on loess plateau [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2003, **40**(2): 210–217]
- [15] 常译方,毕华兴,许华森,等. 晋西黄土区不同密度刺槐林对土壤水分的影响[J]. 水土保持学报,2015,**29**(6):227–232 [CHANG Yifang, BI Huaxing, XU Huasen, et al. Influence of different densities of *Robinia pseudoacacia* forest on soil moisture in Loess Region of Western Shanxi Province [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2015, **29**(6): 227–232]
- [16] 牛俊杰,赵景波,王尚义. 汾河流域上游人工林地深层土壤干燥化探讨[J]. 地理研究,2007,**26**(4):773–781 [NIU Junjie, ZHAO Jingbo, WANG Shangyi. A study on plantation soil desiccation in the upper reaches of the Fenhe River basin based on deep soil experiments [J]. *Geographical Research*, 2007, **26**(4): 773–781]
- [17] 王力,邵明安,王全九. 林地土壤水分运动研究述评[J]. 林业科学,2005,**41**(2):147–153 [WANG Li, SHAO Mingan, WANG Quanjui. Review on soil water movement in forestland [J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2005, **41**(2): 147–153]
- [18] 王志强,刘宝元,张岩. 不同植被类型对厚层黄土剖面水分含量的影响[J]. 地理学报,2008,**63**(7):703–713 [WANG Zhiqiang, LIU Baoyuan, ZHANG Yan. Effects of different vegetation types on soil moisture in deep loess soil profiles [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2008, **63**(7): 703–713]
- [19] 张建军,李慧敏,徐佳佳. 黄土高原水土保持林对土壤水分的影响[J]. 生态学报,2011,**31**(23):7056–7066 [ZHANG Jianjun, LI Huimin, XU Jiajia. Soil moisture dynamics of water and soil conservation forest on the Loess Plateau [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, **31**(23): 7056–7066]
- [20] CHEN L, WANG J, WEI W, et al. Effects of landscape restoration on soil water storage and water use in the Loess Plateau Region, China [J]. *Forest Ecology & Management*, 2010, **259**(7): 1291–1298
- [21] BATES JD, SVEJCAR TS, MILLER RF. Litter decomposition in cut and uncut western juniper woodlands [J]. *Journal of Arid Environments*, 2007, **70**(2): 222–236
- [22] 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 [LI Hong, FAN Sufang, ZHANG Guangcan, et al. Characteristics of soil water-holding and soil porosity under different tree species after conversion of cropland to forest in the loess hilly region [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2010, **30**(1): 27–30]
- [23] 刘彩虹,卞建民,王宇. 吉林西部盐碱土壤水力学参数特征及其影响因素[J]. 东北大学学报,2016,**37**(2):268–272 [LIU Caihong, BIAN Jianmin, WANG Yu. Characteristics of soil hydraulic parameters and impact factor analysis for saline-alkali soils in the western Jilin Province [J]. *Journal of Northeastern University(Natural Science)*, 2016, **37**(2): 268–272]
- [24] 郑荣伟,冯绍元,郑艳侠. 北京通州区典型农田土壤水分特征曲线测定及影响因素分析[J]. 灌溉排水学报,2011,**30**(3):77–81 [ZHENG Rongwei, FENG Shaoyuan, ZHENG Yanxia. Discussion on the soil water characteristic curve of the agricultural soil in the new city of Tongzhou [J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2011, **30**(3): 77–81]
- [25] 吕殿青,王宏,王玲. 离心法测定持水特征中的土壤收缩变化研究[J]. 水土保持学报,2010,**24**(3):209–216 [LV Dianqing, WANG Hong, WANG Ling. Soil shrinking change during measuring retention characteristics by centrifugal method [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2010, **24**(3): 209–216]

- [26] 宁婷, 郭忠升, 李耀林. 黄土丘陵区撂荒地土壤水分特征曲线及水分常数的垂直变异[J]. 水土保持学报, 2014, 28(3): 166–170 [NING Ting, GUO Zhongsheng, LI Yaolin. Soil water characteristic curves and soil water constants at different depths in the abandoned sloping field of loess hilly region [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2014, 28(3): 166–170]
- [27] 邢旭光, 赵文刚, 马孝义, 等. 土壤水分特征曲线测定过程中土壤收缩特性研究[J]. 水利学报, 2015, 46(10): 1181–1188 [XING Xuguang, ZHAO Wengang, MA Xiaoyi, et al. Study on soil shrinkage characteristics during soil water characteristic curve measurement [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2015, 46(10): 1181–1188]
- [28] 席彩云, 余新晓, 徐娟, 等. 北京密云山区典型林地土壤入渗特征[J]. 北京林业大学学报, 2009, 31(5): 42–47 [XI Caiyun, YU Xinxiao, XU Juan, et al. Soil Infiltration Characteristics of Typical Plantations in Mountainous Area of Miyun, Beijing [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2009, 31(5): 42–47]
- [29] 党宏忠, 周泽福, 赵雨森, 等. 祁连山水源涵养林土壤水文特征研究[J]. 林业科学研究, 2006, 19(1): 39–44 [DANG Hongzhong, ZHOU Zefu, ZHAO Yusen, et al. Soil hydrological characteristics of water conservation forest in Qilian mountains [J]. Forest Research, 2006, 19(1): 39–44]
- [30] 高婵婵, 赵传燕, 王超, 等. 黑河上游天老池流域不同植被下土壤理化性质和入渗特征[J]. 水土保持学报, 2016, 30(1): 117–126 [GAO Chanchan, ZHAO Chuanyan, WANG Chao, et al. Soil physicochemical properties and infiltration characteristics under different vegetation types in Tianlaoshi watershed in the upstream of Heihe River [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2016, 30(1): 117–126]
- [31] MEI X, ZHU Q, MA L, et al. Effect of stand origin and slope position on infiltration pattern and preferential flow on a Loess hillslope [J]. Land Degradation & Development, 2018: 1–13
- [32] WANG S, FU BJ, GAO GY, et al. The hydrological responses of different land cover types in a re-vegetation catchment area of the Loess Plateau [J]. Hydrology and Earth System Sciences Discussions, 2012, 9(5): 5809–5835
- [33] 金建新, 桂林国, 尹志荣, 等. 宁夏典型土壤持水性能及收缩特征[J]. 水土保持研究, 2017, 24(4): 279–283 [JIN Jianguo, GUI Linguo, YIN Zhirong, et al. Soil moisture curve and shrinkage characteristic of different areas in Ningxia [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2017, 24(4): 279–283]

Effects of Different Types of Woodland on Soil Moisture Characteristics in the Loess Plateau of Western Shanxi Province, China

HUO Jiayi¹, CHEN Lihua^{1,2*}, JI Jinnan¹, QU Wenbin¹

(1. College of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China;

2. National Field Research Station of Forest Ecosystem in Jixian County, Jixian, Shanxi 042200, China)

Abstract: To reveal the soil moisture characteristics of typical plantations in the loess region of western Shanxi Province, the soil moisture, water characteristic curve and infiltration rate were analyzed in the *Robinia pseudoacacia*, *pinus tabulaeformis*, and *Syzygium aromaticum* plantations as well as the referenced bare land. The results indicated that (1) the soil moisture in the *S. aromaticum* plantation was higher than the *P. tabulaeformis* plantation. Further, the soil moisture in the *R. pseudoacacia* plantation was the lowest with an obviously dry soil layer in 80 cm. (2) The soil water characteristic curve (SWCC) at different soil depths showed a trend of fast descending – slow descending – basically stable. Soil water-holding capacity in the *S. aromaticum* plantation was better than the arbor plantations, and the soil water holding capacity was the worst in the bare land. (3) The order of the initial and stable infiltration rates in different typical plantations were as follows: *S. aromaticum*, *R. pseudoacacia*, *P. tabulaeformis* and the bare land. Kostiaikov, Philip and Horton models fitted well with soil water infiltration in loess region. In short, the soil water characteristics were quite different among the typical plantations. The soil moisture characteristic in shrub plantation were better than arbor plantation, and shrub plantation was more suitable for the natural conditions of the loess region. Therefore, the shrub plantation should be paid more attention during vegetation construction, and the arbor plantation should be reasonably controlled in the loess region.

Key words: Shanxi province; loess region; soil moisture; soil water characteristic curve; infiltration rate