接坝山区陡坡地段阔叶林改造对水文生态环境的影响

塔 莉[1], 梁文俊[2]

(1. 河北环境工程学院 生态学系, 河北 秦皇岛 066102; 2. 山西农业大学, 山西 太谷 030800)

摘 要: [目的] 研究接坝山区陡坡地段引针入阔进行阔叶林改造以后对水文生态环境的影响,为该区造林与改善水文生态环境提供一定的科学依据。[方法] 以研究区 3 种典型植被类型作为研究对象,采用室内浸泡法、环刀法分别对枯落物层与土壤层水文生态效应进行定量测定。[结果] ①枯落物蓄积量依次为:油松—山杏混交林>山杏林>绣线菊灌丛;有效拦蓄量依次为:油松—山杏混交林>山杏林>绣线菊灌丛;枯落物持水量、枯落物持水速率与浸水时间存在较好的函数关系。②3 种植被类型有效持水量依次为:油松—山杏混交林(69.00 t/hm^2)>山杏林(60.87 t/hm^2)>绣线菊灌丛(55.60 t/hm^2);3 种植被类型中油松—山杏混交林初渗速率最大为 29.78 mm/min,绣线菊灌丛初渗速率最小为 22.38 mm/min;3 种植被类型土壤入渗速率与入渗时间存在较好的幂函数关系(R^2>0.97)。[结论] 3 种不同植被类型中油松—山杏混交林水源涵养功能最强,而绣线菊灌丛水源涵养能力最差,说明在陡坡地段进行阔叶林改造在一定程度上增强了林分水源涵养能力,改善了林分水文生态环境,因此从增强涵养水源的角度出发,建议在该地区灌木林与阔叶林中引入适当密度油松,从而改善该地区水文生态环境。

关键词: 陡坡地段; 引针入阔; 植被类型; 水文生态

文献标识码: A **文章编号**: 1000-288X(2019)04-0166-06 **中图分类号**: S714.7, S715

文献参数: 塔莉, 梁文俊. 接坝山区陡坡地段引针入阔对水文生态环境的影响[J]. 水土保持通报,2019,39(4):166-171. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2019.04.026; Ta Li, Liang Wenjun. Effects of broad-leaved forest transformation on hydrological and ecological environment in steep slope section of dam area[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2019,39(4):166-171.

Effects of Broad-leaved Forest Transformation on Hydrological and Ecological Environment in Steep Slope Section of Dam Area

Ta Li[1], Liang Wenjun[2]

(1. *Department of Ecology, Hebei University of Environmental Engineering, Qinhuangdao, Hebei* 066102, *China*; 2. *Shanxi Agricultural University, Taigu, Shanxi* 030800, *China*)

Abstract: [Objective] The effects on the hydrological and ecological environment, after the needle-leaved trees inserted into the the broad-leaved forests at steep slope of the dam area, were studied in order to provide a scientific basis for afforestation and improvement of hydrological and ecological environment. [Methods] Three typical vegetation types in the study area were used as research objects, and the hydrological and ecological effects of litter layer and soil layer were quantitatively determined by indoor immersion method and ring knife method. [Results] ① The accumulation of litter was in the order of *Pinus tabuliformis*-Apricot mixed forest > Mountain apricot forest> *Spiraea* shrub; the effective storage capacity was in the order of *Pinus tabuliformis*-Apricot mixed forest > Mountain apricot forest>*Spiraea* shrub. There was a good functional relationship between the water holding capacity of litter and the water holding rate of litter and the water immersion time. ② The effective water holding capacity of the 3 planting types was *Pinus tabuliformis*-Apricot mixed forest (69.00 t/hm^2)>Mountain apricot forest (60.87 t/hm^2)>*Spiraea* shrub (55.60 t/hm^2);

收稿日期:2019-04-10 **修回日期**:2019-05-06

资助项目:河北省林业和草原局项目"基于 ArcGIS 应用对木兰围场接坝山区陡坡地段立体植被构造技术研究"(1903003); 国家自然科学基金项目"基于森林空间结构的华北落叶松人工林种子萌发及幼苗成活机制研究"(31500523)

第一作者:塔莉(1978—),女(满族),吉林省长春市人,讲师,硕士,主要从事生态环境保护方面的研究。E-mail:tali504@163.com。

通讯作者:梁文俊(1983—),男(汉族),山西省朔州市人,博士,副教授,主要从事森林生态、荒漠化防治方面的研究。E-mail:283580862@qq.com。

The initial infiltration rate of *Pinus tabuliformis*-Apricot mixed forest was 29.78 mm/min, and the minimum infiltration rate of *Spiraea* shrub was 22.38 mm/min. The infiltration rate and infiltration time of three planting types had better power($R^2>0.97$). [Conclusion] Combining the water holding capacity of the litter layer and the soil layer, it could be seen that the water conservation function of the *Pinus tabuliformis*-Apricot mixed forest was the strongest among the three different vegetation types, while the water conservation capacity of the *Spiraea* shrub was the worst. It indicated that broad-leaved forest transformation had enhanced the water conservation capacity of forests and improved the hydrological and ecological environment of forests in the steep slope area. Therefore, from the perspective of enhancing water conservation, it was recommended to introduce appropriate density of *Pinus tabuliformis* in shrubs and broad-leaved forests in the area to improve the hydrological ecological environment of the area.

Keywords: steep slope section; needle-leaved trees insertied into broad-leaved forests; vegetation type; hydrological ecology

接坝地区地处滦河上游，对下游地区的树木生长和水源涵养影响较重，是浑善达克沙地与北京地区之间的一道天然绿色屏障，阻挡着浑善达克沙地向北京地区进军的风沙，担负着护卫京津生态安全这一重任，当今社会对生态环境质量的要求日益增高，人们对绿色生活的更加向往，但是目前清新的空气、清洁的水源和宜人的气候等生态产品明显短缺，而植树造林是我们提高环境质量、保护地球的一种最好、最有效、最直接的方法，森林能够通过枯落物层与土壤层的生态功能来调节大气水分循环，从而起到涵养水源、保持水土、净化水质等作用[1-2]。接坝地区始终致力于森林的培育，植被覆盖率高，但是坡度较高的阳面陡坡地段仍是植被重建和治理水土流失的重点、难点。目前国内对该地区的研究主要集中在林分结构、生物多样性、森林健康评价、针叶纯林水文效应等方面，而对陡坡地段植被水文生态研究较少。本文以陡坡地段较为常见的两种植被类型与引针入阔以后的林分作为研究对象，探究其枯落物层与土壤层水文生态效应，旨在为该地区造林与改善水文生态环境提供一定的科学依据[3-4]。

1　研究区概况

研究区设在木兰围场国有林场管理局，位于河北省围场满族蒙古族自治县境内，区域地理坐标为北纬 41°35′—42°40′，东经 116°32′—117°14′，地处浑善达克沙地南缘，与塞罕坝均属滦河上游地区，是阴山、大兴安岭、燕山余脉的汇接地段，同时也是连接坝上高原与冀北山地的结合部，其地质构造主要趋向于内蒙古台背斜区，海拔相差较大，从 750～1 998 m。这一地区属半干旱向半湿润过度、寒温带向中温带过度、大陆性季风型山地气候，无霜期 67～128 d，年平均气温－1.4～4.7 ℃，极端最高气温 38.9 ℃，极端最低气温－42.9 ℃，年均降水量 380～560 mm，土壤类型主要是黄棕壤与黑棕壤。研究区内植被主要乔木树种有华北落叶松(*Larix principis-rupprechtii* Mayr.)、油松(*Pinus tabulaeformis*)、云杉(*Picea asperata*)、黑桦(*Betula dahurica*)、山杨(*Populus davidiana*)、山杏(*Armeniaca sibirica*)、蒙古栎(*Quercus Mongolica*)、白桦(*Betula platyphylla*)等；林下灌木主要有榛子(*Corylus heterophylla*)、胡枝子(*Lespedeza bicolor*)、沙棘(*Hippophae rhamnoides*)、绣线菊(*Spiraea salicifolia*)等；草本植物主要乌苏里苔草(*Carex ussuriensis*)、歪头菜(*Vicia unijuga*)、宽叶苔草(*Carex siderosticta*)、小花油点草(*Tricyrtis macropoda*)、野艾蒿(*Artemisia lavandulaefolia*)等。

2　标准地设置与研究方法

试验地设置在木兰围场国有林场管理局北沟林场哈叭气营林区，于 2017 年 6—9 月选择绣线菊灌丛、山杏林与油松—山杏混交林三种植被类型作为研究对象，并在每个植被内设置 3 块大小为 30 m×30 m 的标准地并调查林分的基本情况，其中植被覆盖度通过实地测定植被的投影面积并结合该林场的遥感地图来确定(表 1)。

表 1　研究区 3 种植被类型标准地概况

植被类型	坡度/(°)	海拔/m	植被覆盖度/%	土壤类型	平均胸径/cm	平均树高/m	土壤深度/cm
绣线菊灌丛	26～29	960	60	棕壤		1.2	31
山杏林	27～28	925	75	棕壤	6.7	4.8	39
油松—山杏混交林	26～28	945	90	棕壤	8.5	5.7	43

2.1 枯落物层水文测定

在标准样地 4 个角和中心位置各取面积为 50 cm×50 cm 的小样方 5 个，按照分解程度（未分解、半分解）分层取样并测定厚度、鲜重。将枯落物带回实验室，随后在设定 75 ℃的烘箱进行烘干至恒重，统计各样地内枯落物的蓄积量。利用室内浸泡法对枯落物的持水能力进行测定，在尼龙网里放置烘干的枯落物并浸在水中，分别测定 0.25，0.5，1，2，4，6，8，10 和 24 h时枯落物样品重量的变化，从而对枯落物持水量、持水过程进行研究[5-7]。为体现枯落物的真实拦蓄量一般都用有效拦蓄量表示：

$$W=(0.85R_m-R_0)M$$

式中：W——有效拦蓄量（t/hm^2）；R_m——最大持水率（%）；R_0——自然含水率（%）；M——枯落物储量（t/hm^2）。

2.2 土壤层水文测定

利用环刀法和双环法对土壤层的物理性质进行测定，在林分标准地中选取适宜地点进行土壤剖面的挖取，将土壤分为 3 层，分别为 0—10 cm，10—20 cm 和 20—30 cm，并对土壤容重、非毛管孔隙度、毛管孔隙度等持水能力指标进行测定[8-10]。土壤持水量计算公式为：

$$W=10\ 000P\cdot h$$

式中：W——土壤持水量（t/hm^2）；P——土壤孔隙度（%）；h——土壤厚度（m）。

3 结果与分析

3.1 枯落物蓄积量

由表 2 可知，研究区 3 种植被类型林分枯落物厚度变化范围为 11.5～14.8 mm，总蓄积量变动范围为 6.24～9.23 t/hm^2，其中油松—山杏混交林均为最大，绣线菊灌丛均为最小，未分解层蓄积量均低于半分解层，这种现象是由于枯落物蓄积量影响因素较多，决定枯落蓄积量则是枯枝落叶进入量与分解量，进入量受到林分树种组成、郁闭度、样地的水平及垂直结构、本身的厚度和林下植被生长情况等因素影响，分解量则受到树种组成、温度、湿度、光照等因素影响，综上可知引针入阔有利于林分枯落物的形成。

表 2 研究区 3 种植被类型枯落物层厚度与蓄积量

植被类型	总厚度/mm	总蓄积量/(t·hm^{-2})	未分解层			半分解层		
			厚度/mm	蓄积量/(t·hm^{-2})	占总量比例/%	厚度/mm	蓄积量/(t·hm^{-2})	占总量比例/%
绣线菊灌丛	11.5	6.24	6.0	2.97	47.60	5.5	3.27	52.40
山杏林	13.6	8.55	5.9	3.26	38.13	7.7	5.29	61.87
油松—山杏混交林	14.8	9.23	7.3	3.55	38.46	7.5	5.68	61.54

3.2 枯落物水文生态效应

3.2.1 *枯落物最大持水量* 由表 3 可知，研究区 3 种植被类型中油松—山杏混交林最大持水量最大，为 26.30 t/hm^2，是最大持水量最小绣线菊灌丛（16.61 t/hm^2）的 1.6 倍，这是由于油松—山杏混交林形成的枯落物蓄积量明显高于绣线菊灌丛；3 种植被类型最大持水率变化范围在 265.78%～281.27%之间，依次为：油松—山杏混交林（281.27%）＞山杏林（268.13%）＞绣线菊灌丛（265.78%）。油松—山杏混交林最大持水量和最大持水率均高于陡坡地区原有的两种林分，而最大持水量反映了林分拦蓄能力的潜力，表明引入针叶树种有助于提高该地区最大持水潜力的提高。

表 3 研究区 3 种植被类型最大持水量与最大持水率

植被类型	最大持水量/(t·hm^{-2})			最大持水率/%		
	未分解层	半分解层	总和	未分解层	半分解层	平均
绣线菊灌丛	7.64	8.97	16.61	257.24	274.31	265.78
山杏林	8.46	14.64	23.10	259.51	276.75	268.13
油松—山杏混交林	9.42	16.88	26.30	265.35	297.18	281.27

3.2.2 *枯落物有效拦蓄量* 由表 4 可知，研究区 3 种植被类型枯落物未分解层有效拦蓄量变化范围为 6.32～7.78 t/hm^2，差距不是特别明显，半分解层有效拦蓄量变化范围为 7.32～13.54 t/hm^2，枯落物的两个层次大小排序一致，均表现为：油松—山杏混交林＞山杏林＞绣线菊灌丛，在测定林分拦蓄能力时一般采用有效拦蓄量来代表林分真实拦蓄能力，而采用最大持水量代表林分拦蓄能力会导致结果偏高，综合以上 3 种植被类型枯落物有效拦蓄量变化规律，可知油松—山杏混交林真实拦蓄能力最强，即在山杏林引

入油松后提高了林分枯落物层有效拦蓄能力,枯落物层有效拦蓄量受到林分树种组成、枯落物蓄积量、郁闭度、温度、湿度与林下植被生长情况等因素影响,引针入阔要遵循去掉较弱的阔叶树植入优良针叶树种的原则,在一定程度上提高了林分整体质量,并且阔叶引入针叶树种后提高了林分郁闭度,有效增加枯落物层蓄积量对林分有效拦蓄量有一定的促进作用。

3.2.3　枯落物持水过程　由图 1 可知,研究区 3 种植被类型枯落物未分解层、半分解层持水过程变化趋势较一致,在枯落物持水初期,枯落物较干燥,其吸水速度较快,林分枯落物蓄积量越多,在一定时间内持水的水量越大,试验中枯落物持水量在浸泡前 0.5 h 内迅速增加,持水量随着时间推移逐渐变缓,3 种植被类型在浸泡 10 h 时基本处于饱和状态,室内浸泡法模拟的持水过程与室外降雨过程中枯落物表现趋势基本一致,即降雨初期,枯落物由于较干燥拦蓄降雨的功能较强,随后由于枯落物湿度增加,一定时间内持水量减少,最后枯落物蓄水饱和将不再吸水。3 种植被类型枯落物未分解层、半分解层表现的持水规律均为:油松—山杏混交林>山杏林>绣线菊灌丛。

表 4　研究区 3 种植被类型枯落物有效拦蓄量

枯落物层	植被类型	自然含水率/%	有效拦蓄率/%	有效拦蓄量/(t·hm^{-2})	有效拦蓄深/mm
未分解层	绣线菊灌丛	5.97	212.68	6.32	0.63
	山杏林	5.90	214.68	7.00	0.70
	油松—山杏混交林	6.31	219.24	7.78	0.78
半分解层	绣线菊灌丛	9.21	223.96	7.32	0.73
	山杏林	13.46	221.78	11.73	1.17
	油松—山杏混交林	14.21	238.40	13.54	1.35

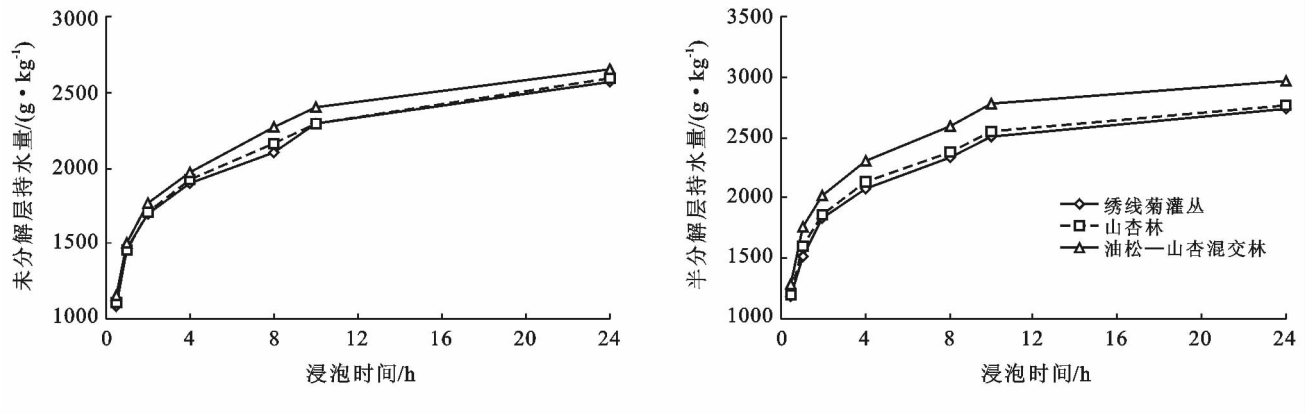


图 1　研究区 3 种植被类型枯落物持水量变化过程

对 3 种植被类型枯落物各层持水量与浸泡时间的关系进行拟合分析,两者存在较好的函数关系(表 5),具体表达式为:

$$Q=a\ln(t)+b$$

式中:Q,t,a,b——枯落物持水量(g/kg)、浸泡时间(h)、方程系数和常数项。

表 5　研究区 3 种植被类型枯落物持水量、持水率与浸泡时间关系

层次	植被类型	持水量与浸泡时间关系式	相关系数 R^2	持水率与浸泡时间关系式	相关系数 R^2
未分解层	绣线菊灌丛	$Q=368.29\ln(t)+1\,402.2$	0.990 9	$V=1\,294.7t^{-0.752}$	0.992 2
	山杏林	$Q=374.1\ln(t)+1\,413.2$	0.995 4	$V=1\,417.5t^{-0.783}$	0.994 9
	油松—山杏混交林	$Q=384.72\ln(t)+1\,468.6$	0.994 6	$V=1\,486.0t^{-0.79}$	0.994 9
半分解层	绣线菊灌丛	$Q=403.6\ln(t)+1\,511.5$	0.994 3	$V=1\,512.2t^{-0.783}$	0.995 5
	山杏林	$Q=401.61\ln(t)+1\,560.4$	0.989 2	$V=1\,515.9t^{-0.778}$	0.995 7
	油松—山杏混交林	$Q=434.44\ln(t)+1\,691.8$	0.984 1	$V=1\,678.6t^{-0.788}$	0.994 6

3.2.4　枯落物吸水速率　由图 2 可知,3 种植被类型枯落物两个层次吸水速率变化趋势较为一致,均与浸水时间呈“倒 J”形曲线:枯落物浸泡初期吸水速率非常高,后迅速下降,达到 4 h 后下降速度明显减缓,在 10 h 后没有较大变化。3 种植被类型枯落物未分解层、半分解层在浸泡初期,油松—山杏混交林吸水速率最大,高于其他两种林分,绣线菊灌丛远远低于乔木林分,3 种植被类型枯落物未分解层、半分解层吸水速率与浸泡时间的关系进行拟合,两者具有较好函数关系(表 5),表达式为:

$$V=kt^n \quad (R^2>0.99)$$

式中：V，t，k，n——枯落物吸水速率〔g/(kg·h)〕、浸泡时间(h)、方程系数和指数，其中 n 是由持水率与时间进行函数拟合得出。

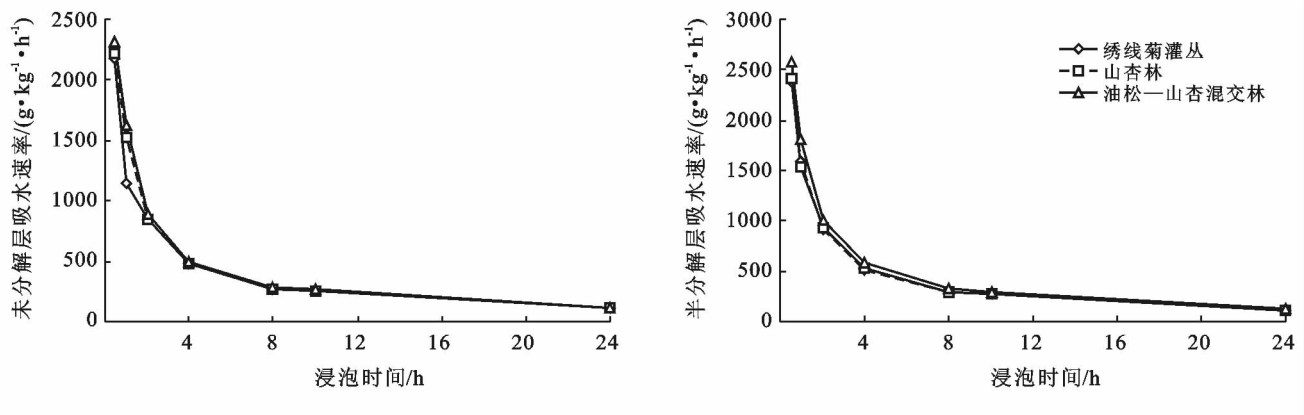


图 2 研究区 3 种植被类型枯落物吸水速率变化过程

3.3 土壤层物理性质及水文生态效应

3.3.1 *土壤物理性质* 由表 6 可知，研究区 3 种植被类型土壤容重大小排序为：山杏林(1.15 g/cm³)＞油松—山杏混交林(1.12 g/cm³)＞绣线菊灌丛(1.10 g/cm³)，土壤垂直面上随着深度的增加土壤容重呈现增大的趋势。

非毛管孔隙度决定土壤有效持水量的大小，3 种植被类型大小排序为：油松—山杏混交林(6.90%)＞山杏林(6.09%)＞绣线菊灌丛(5.56%)，说明油松—山杏混交林有效持水量最高，这是由于引针入阔时要提前进行土地的整理并且采取减弱干扰乔木与灌木等干扰因素，增加了针叶树种生长空间，有利于非毛管孔隙度的形成，因此引针入阔提高了土壤层的有效拦蓄量。

表 6 研究区 3 种植被类型土壤物理性质及持水量

植被类型	土层厚度/cm	土壤容重/(g·cm⁻³)	总孔隙度/%	非毛管孔隙度/%	毛管孔隙度/%	有效持水量/(t·hm⁻²)	毛管持水量/(t·hm⁻²)	饱和持水量/(t·hm⁻²)
绣线菊灌丛	0—10	1.01	42.56	6.59	35.97	65.90	425.60	1.01
	10—20	1.12	39.36	5.87	33.49	58.70	393.60	1.12
	20—30	1.16	36.48	4.22	32.26	84.40	364.80	1.16
	平均	1.10	39.47	5.56	33.91	55.60	394.67	1.10
山杏林	0—10	1.05	46.02	7.53	38.49	75.30	460.20	1.05
	10—20	1.18	43.23	6.18	37.05	61.80	432.30	1.18
	20—30	1.22	40.67	4.55	36.12	91.00	406.70	1.22
	平均	1.15	43.31	6.09	37.22	60.87	433.07	1.15
油松—山杏混交林	0—10	1.02	49.76	8.54	41.22	85.40	497.60	1.02
	10—20	1.15	45.80	7.06	38.74	70.60	458.00	1.15
	20—30	1.18	42.05	5.10	36.95	102.00	420.50	1.18
	平均	1.12	45.87	6.90	38.97	69.00	458.70	1.12

3.3.2 *土壤层孔隙度与蓄水能力* 由表 6 可知，不同植被土壤结构有一定的差异，土壤孔隙一定程度上影响了土壤通透性与土壤持水量。非毛管孔隙度决定了林分土壤层有效涵养能力的强弱，有效持水量依次为：油松—山杏混交林(69.00 t/hm²)＞山杏林(60.87 t/hm²)＞绣线菊灌丛(55.60 t/hm²)；饱和持水量依次为：油松—山杏混交林(458.70 t/hm²)＞山杏林(433.07 t/hm²)＞绣线菊灌丛(394.67 t/hm²)。林分土壤蓄水能力是判定林分水文生态效应的重要指标之一，而决定林分土壤蓄水能力的主要因子是土壤结构，综合以上饱和持水量和有效持水量表现可知，油松—山杏混交林的土壤持水能力最强，即油松—山杏混交林土壤层水文生态效应最好，说明引针入阔提高了土壤层蓄水能力，改善了水文生态环境。

3.3.3 *土壤层的渗透性* 由表 7 可知，3 种植被类型土壤层初渗速率差距比较大，油松—山杏混交林初渗速率最大为 29.78 mm/min，绣线菊灌丛初渗速率最小为 22.38 mm/min，前者为后者的 1.33 倍，随着

时间的推移,入渗速率逐渐减慢,直至趋于稳渗,3 种植被类型稳渗速率变化范围为 0.96～1.29 mm/min,依次为:油松—山杏混交林(1.29 mm/min)>山杏林(1.06 mm/min)>绣线菊灌丛(0.96 mm/min),林分土壤渗透性越好,其水源涵养能力越强,反映出林分土壤层水文生态效应越好,说明引针入阔有效提高了水源涵养能力,改善了水文生态环境。对 3 种植被类型入渗速率与时间进行函数拟合(图 3),两者具有较好的幂函数关系:

$$f=at^{-b} \qquad (R^2>0.97)$$

式中:f——入渗速率(mm/min);a,b——常数;t——入渗时间(min)。

表 7　研究区 3 种植被类型土壤渗透的速率及渗透数学模型

植被类型	初渗速率/(mm·min^{-1})	稳渗速率/(mm·min^{-1})	稳渗时间/min	回归方程	R^2
绣线菊灌丛	22.38	0.96	28	$f=11.27\ t^{-0.676}$	0.987 6
山杏林	26.41	1.06	30	$f=13.751\ t^{-0.678}$	0.977 3
油松—山杏混交林	29.78	1.29	34	$f=15.908\ t^{-0.635}$	0.975 7

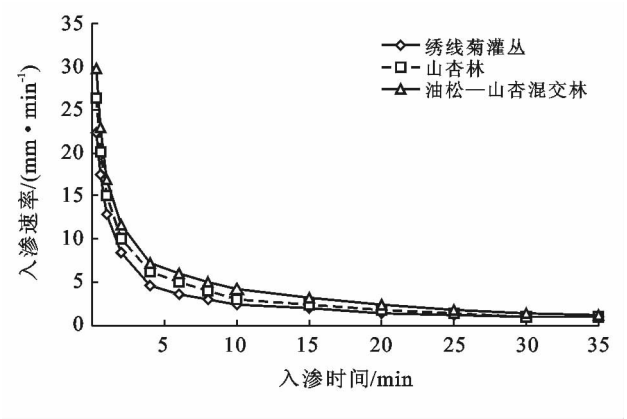


图 3　研究区 3 种植被类型土壤入渗过程

4　结 论

(1) 研究区枯落物蓄积量依次为:油松—山杏混交林(9.23 t/hm^2)>山杏林(8.55 t/hm^2)>绣线菊灌丛(6.24 t/hm^2);有效拦蓄量依次为:油松—山杏混交林(21.32 t/hm^2)>山杏林(18.73 t/hm^2)>绣线菊灌丛(13.64 t/hm^2),有效拦蓄量决定了林分枯落物层真实拦蓄能力,但是受到的影响因子较多,与蓄积量、自然含水量和降雨特征等均有关;枯落物持水量、枯落物持水速率与浸水时间存在较好的函数关系,与陈波等[11]研究结果相一致。

(2) 研究区 3 种植被类型土壤容重随着土壤深度的增大而呈现增大的趋势,非毛管孔隙度则与之相反,这与涂志华等[12]研究结果一致;3 种植被类型中油松—山杏混交林土壤层饱和持水量与有效持水量均为最大,主要取决于油松—山杏混交林土壤的孔隙特性,土壤结构决定林分土壤蓄水能力,土壤蓄水能力反映了林分土壤层水文生态环境是否良好,研究中油松—山杏混交林的土壤持水能力最强,即油松—山杏混交林土壤层水文生态效应最好,说明阔叶林改造提高了土壤层蓄水能力,改善了水文生态环境;3 种植被类型中油松—山杏混交林初渗速率最大为 29.78 mm/min,绣线菊灌丛初渗速率最小为 22.38 mm/min,林分土壤渗透性越好,其水源涵养能力越强,反映出林分土壤层水文生态效应越好,这说明阔叶林改造有效地提高了其水源涵养能力,改善了水文生态环境;3 种植被类型土壤入渗速率与入渗时间之间存在较好的幂函数关系($R>0.97$),这与韩雪成等[13]的研究结果一致。

(3) 综合枯落物层与土壤层持水能力可知,3 种不同植被类型中油松—山杏混交林水源涵养功能最强,而绣线菊灌丛水源涵养能力最差,说明在陡坡地段阔叶林改造在一定程度上增强了林分水源涵养能力,改善了林分水文生态环境,因此从增强涵养水源的角度出发,建议在该地区灌木林与阔叶林中引入适当密度油松,从而改善该地区水文生态环境。

(4) 影响枯落物有效拦蓄量的因子较多,包括蓄积量、自然含水量和降雨特征等。本研究未将主要因素进行明确,需要进一步的进行试验来确定。但是本研究只引入了油松,未将该地区的主要树种华北落叶松与云杉进行引入,需要进一步引入探究。

[参 考 文 献]

[1] 田超,杨新兵,李军,等.冀北山地不同海拔蒙古栎林枯落物和土壤水文效应[J].水土保持学报,2011,25(4):222-227.

[2] 张振明,余新晓,牛健植,等.不同林分枯落物层的水文生态功能[J].水土保持学报,2006,19(3):139-143.

[3] 姜海燕,赵雨森,陈祥伟,等.大兴安岭岭南几种主要森林类型土壤水文功能研究[J].水土保持学报,2007,21(3):149-153.

(下转第 176 页)

[5] 范淑秀,李培军,何娜,等.多环芳烃污染土壤的植物修复研究进展[J].农业环境科学学报,2007,26(6):2007-2013.

[6] Bais H P, Weir, T L, Perry L G, et al. The role of root exudates in rhizosphere interactions with plants and other organisms[J]. Annual Review of Plant Biology, 2006,57(1):233-266.

[7] Pan Shengwang , Yuan Xin , Liu Can, et al. Effects of pyrene on low molecule weight organic compounds in the root exudates of five species of Festuca[J]. Environmental Science, 2016,37(6):2368-2375.

[8] 杨艳.多环芳烃污染的根系分泌效应[D].江苏 南京:南京农业大学,2009.

[9] 王姣龙.4 种绿化树种根系分泌物对多环芳烃胁迫的响应[D].湖南 长沙:中南林业科技大学,2015.

[10] 赵宽,吴沿友.根系分泌的有机酸及其对喀斯特植物、土壤碳汇的影响[J].中国岩溶,2011,30(4):466-471.

[11] 涂书新,吴佳.植物根系分泌物研究方法评述[J].生态环境学报,2010,19(10):2493-2500.

[12] 许超,夏北成.芘对玉米根系分泌氨基酸的影响[J].生态环境学报,2009,18(1):172-175.

[13] 刘静,周美利,张楠,陈国平,等.多环芳烃菲和芘对互花米草生长和生理特征的影响[J].南开大学学报:自然科学版,2015,48(01):14-20.

[14] 井大炜,马海林,刘方春,等.盐胁迫环境下接种根际促生细菌对白蜡树根际生物学特征及其生长的影响[J].水土保持通报,2018,38(1):76-81.

[15] 刘克彪,张元恺,李发明.黑果枸杞种子萌发对水分和钠盐胁迫的响应[J].经济林研究,2014(4):45-51.

[16] 周乃富,袁军,高超,等.生草栽培对油茶林地土壤理化性质的影响[J].经济林研究,2014(3):76-80.

[17] Ma Jianfeng, Zheng Shaojian, Matsumoto H. Specific secretion of citric acid induced by Al stress in *Cassia tora* L. [J]. Plant and Cell Physiology,1997,38(9):1019-1025.

[18] 林琦,陈英旭,陈怀满,等.小麦根际铅、镉的生态效应[J].生态学报,2000,20(4):634-638.

(上接第 171 页)

[4] 杨振奇,秦富仓,李晓琴,等.砒砂岩区主要造林树种枯落物及林下土壤持水特性[J].水土保持报,2017,31(3):118-122.

[5] 喻阳华,李光容,皮发剑,等.赤水河上游主要森林类型水源涵养功能评价[J].水土保持学报,2015,29(2):150-156.

[6] 张伟.冀北山地森林水文特征研究[D].河北 保定:河北农业大学,2011.

[7] 梁晓娇,王树力.阿什河源头不同类型红松人工林枯落物及其土壤水文特性[J].水土保持学报,2017,31(1):140-145.

[8] 杨振奇,秦富仓,李晓琴,等.砒砂岩区主要造林树种枯落物及林下土壤持水特性[J].水土保持学报,2017,31(3):118-122.

[9] 谈正鑫,万福绪,张涛.盱眙人工林枯落物及土壤水文效应研究[J].水土保持研究,2015,22(4):184-188.

[10] 鲁绍伟,陈波,潘青华,等.北京山地不同海拔人工油松林枯落物及其土壤水文效应水土保持研究[J].2013,20(6):54-58.

[11] 陈波,孟成生,赵耀新,等.冀北山地不同海拔华北落叶松人工林枯落物和土壤水文效应[J].水土保持学报,2012,26(3):216-221.

[12] 涂志华,范志平,孙学凯,等.大伙房水库流域不同植被类型枯落物层和土壤层水文效应[J].水土保持学报,2019,33(1):127-133.

[13] 韩雪成,赵雨森,辛颖,等.大兴安岭北部火烧迹地兴安落叶松人工林土壤水文效应[J].水土保持学报,2012,26(4):183-188.