

# 冀北山地天然次生林枯落物层水文生态功能对不同林分密度的响应

塔莉<sup>1</sup>, 张丽茹<sup>2</sup>

(1.河北环境工程学院 生态学系, 河北 秦皇岛 066102; 2.河北省木兰围场国有林场, 河北 围场 068450)

**摘要:**为研究冀北山地天然次生林枯落物层水文生态功能对不同林分密度的响应,以该地区 5 种密度天然次生林作为研究对象,采用室内浸泡法对枯落物层水文生态效应进行了定量测定。结果表明:(1) 枯落物厚度范围为 45.34~60.70 mm,蓄积量为 11.56~19.64 t/hm<sup>2</sup>,依次排序为 930 株/hm<sup>2</sup>>1 190 株/hm<sup>2</sup>>780 株/hm<sup>2</sup>>520 株/hm<sup>2</sup>>280 株/hm<sup>2</sup>,即随着林分密度增加呈现先增长后减小的变化规律。(2) 枯落物层最大持水量变化范围为 23.26~44.67 t/hm<sup>2</sup>,枯落物最大拦蓄量范围为 21.15~39.56 t/hm<sup>2</sup>,枯落物有效拦蓄量范围为 17.66~32.86 t/hm<sup>2</sup>,大小排序均为:930 株/hm<sup>2</sup>>1 190 株/hm<sup>2</sup>>780 株/hm<sup>2</sup>>520 株/hm<sup>2</sup>>280 株/hm<sup>2</sup>。(3) 枯落物持水量与浸水时间呈明显对数函数关系( $R^2>0.93$ ),持水速率与与浸水时间呈幂函数关系( $R^2>0.99$ )。(4) 综合枯落物层持水能力与拦蓄能力表明密度为 930 株/hm<sup>2</sup>的林分水文生态效应最强,而其他密度水文生态功能相对较差,因此在该地区内针对密度过高或过低的天然次生林进行有效抚育措施有利于增加林分的水源涵养能力。

**关键词:**冀北山地; 不同密度; 次生林; 枯落物; 水文生态

**中图分类号:**S714.7; S715

**文献标识码:**A

**文章编号:**1005-3409(2020)06-0046-06

## Response of Hydro-Ecological Functions of Natural Secondary Forest Litter Layer to Different Stand Densities in Mountainous Area of Northern Hebei Province

TA Li<sup>1</sup>, ZHANG Liru<sup>2</sup>

(1.Department of Ecology, Hebei University of Environmental Engineering, Qinhuangdao, Hebei 066102, China; 2.Mulan-Weichang Forestry Administration of Hebei Province, Weichang, Hebei 068450, China)

**Abstract:** In order to study the hydrological and ecological functions of the natural secondary forest litter layer in different density areas in the Mountain area of northern Hebei Province, the hydro-ecological effects of litter layers of five dense natural secondary forests were quantitatively measured by indoor immersion method. The results showed that: (1) the litter thickness ranged from 45.34 mm to 60.70 mm, and the accumulations ranged from 11.56 t/hm<sup>2</sup> to 19.64 t/hm<sup>2</sup>. The litter thickness decreased in the order: 930 trees/hm<sup>2</sup>>1 190 trees/hm<sup>2</sup>>780 trees/hm<sup>2</sup>>520 trees/hm<sup>2</sup>>280 trees/hm<sup>2</sup>; (2) the maximum water holding capacity of litter layer ranged from 23.26 t/hm<sup>2</sup> to 44.67 t/hm<sup>2</sup>, 21.15 t/hm<sup>2</sup> to 39.56 t/hm<sup>2</sup> and 17.66 t/hm<sup>2</sup> to 32.86 t/hm<sup>2</sup>, respectively; the maximum water holding capacity decreased in the order: 930 trees/hm<sup>2</sup>>1 190 trees/hm<sup>2</sup>>780 trees/hm<sup>2</sup>>520 trees/hm<sup>2</sup>>280 trees/hm<sup>2</sup>; (3) there was a logarithmic function relationship between litter water holding capacity and soaking time ( $R^2>0.93$ ), and a power function relationship between litter water holding rate and soaking time ( $R^2>0.99$ ); (4) the comprehensive water holding capacity and retention capacity of litter layer showed that the ecological and hydrological effect of 930 trees/hm<sup>2</sup> stands was the strongest, while the hydrological and ecological function of other densities was relatively poor. Therefore, effective tending measures for the natural secondary forests with too high or too low density in this area can be conducive to increasing the water conservation capacity of the stands.

收稿日期:2019-11-07

修回日期:2020-01-05

资助项目:河北省林业和草原科学技术研究项目(1903003);国家自然科学基金(31500523,31971644)

第一作者:塔莉(1978—),女,满族,吉林长春人,讲师,硕士,主要从事生态环境保护研究。E-mail:tali504@163.com

通信作者:张丽茹(1968—),女,满族,河北围场人,林业高级工程师,主要从事林业生产与森林生态研究。E-mail:2729915610@qq.com

**Keywords:** mountain area of northern Hebei; different density; secondary forest; litter; hydrological ecology

冀北山地位于华北地区,保护着京津地区的生态与水资源安全,因此该地区的森林生态系统处于较为重要的地位,由于该地区部分地带生态环境脆弱,森林需要进行低效林定向调控,白桦(*Betula platyphylla*)是冀北山地最主要的天然次生林树种,作为主要阔叶树种,也是重要水源涵养树种,为该地区水土保持,保持水源涵养等方面发挥着重要作用<sup>[1-3]</sup>。该地区植被类型丰富,国内对该地区的研究主要方向为林分结构、生物多样性、森林健康评价、针叶纯林水文效应等方面,很少对不同密度的同种林分水文生态效应进行研究,而不同密度天然次生林下枯落物层水文生态效应研究相对更少,在很大程度上限制了大面积天然次生林合理的水文生态功能最大限度的发挥,除此以外,天然次生林作为该地区主要林分,主要树种白桦具有较强的抗逆性,并且为当地重要的水源涵养林分,因此探究该地区不同密度天然次生林的水文生态效应具有较大的指导意义<sup>[4-7]</sup>。因此,本文选择冀北山地 5 种密度梯度天然次生林,对林分枯落物层进行水文过程进行研究,旨在探讨何种密度最有利于发挥林分水文生态作用,从而为冀北山地天然次生林经营、抚育及水文生态功能调节等提供理论依据。

1 研究区概况

研究区设在冀北山地木兰围场地区的北沟林场(116°51′—117°45′E,41°47′—42°06′N),地处浑善达克沙

地南缘,与塞罕坝均属滦河上游地区,海拔相差较大,介于 750~1 998 m。这一地区属半干旱向半湿润过渡、寒温带向中温带过渡、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* (L.) Lam.]、蒙古栎(*Quercus mongolica*)、白桦等。

2 标准地设置与研究方法

2.1 标准地设置

试验地设置河北省围场县北沟林场哈叭气营林区,2017 年 7—9 月在该地区选择 5 种不同密度的天然次生林作为研究对象,并在每种密度内设置 3 块大小为 30 m×30 m 的标准地并调查 5 种不同密度天然次生林基本概况(表 1),分别对样地的郁闭度、海拔、坡度、坡向、林木胸径、树高等因子进行调查,其中林分的郁闭度测定是通过随机在样地内设置 100 个样点,随后在每个位置上抬头垂直昂视,判断该样点是否被树冠覆盖,从而确定被林冠覆盖的样点数,覆盖的样点数与设置的总样点数的比值即为林分的郁闭度<sup>[8-10]</sup>。

表 1 不同密度天然次生林标准地概况

编号	林分密度/(株·hm <sup>-2</sup> )	坡度/(°)	海拔/m	郁闭度	平均胸径/cm	平均树高/m	土壤类型
I	280	22	1110	0.50	14.2	9.7	棕壤
II	520	25	1140	0.65	19.8	14.1	棕壤
III	780	23	1200	0.75	18.4	13.7	棕壤
IV	930	23	1130	0.85	21.1	15.9	棕壤
V	1190	21	1050	0.90	19.1	14.2	棕壤

2.2 枯落物层水文测定

在每个标准样地 4 个角和中心位置各取 5 个小样方,面积为 50 cm×50 cm,根据枯落物分解状态分为未分解与半分解,分别选取样品并用钢尺测量枯落物厚度,利用尼龙袋将两个层次的枯落物带回实验室进行测量。选取枯落物后放置实验室烘箱内,设定 65℃ 的温度进行烘干,枯落物达到恒重后测定各林分枯落物蓄积量,以此来测算枯落物自然含水率<sup>[11-14]</sup>。通过室内浸泡法对各林分枯落物持水性能进行测定,将枯落物浸入水中后,分别记录与计算在 0.25,0.5,1,2,4,6,8,10,24 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,将浸泡 24 h 后枯落物持水量称为枯落物最

大持水量,此时的持水率则是最大持水率<sup>[15-18]</sup>。

枯落物最大持水率、最大持水量、有效拦蓄量计算公式如下:

$$R_m = (M_z - M_g) / M_g \times 100\% \tag{1}$$

式中: $R_m$ 为枯落物最大持水率(%); $M_z$ 为枯落物浸水 24 h 后的质量(t); $M_g$ 为枯落物干质量(t)。

$$W_{\max} = R_m \times M \tag{2}$$

式中: $W_{\max}$ 为枯落物最大持水量(t/hm<sup>2</sup>); $M$ 为枯落物蓄积量(t/hm<sup>2</sup>)。

$$W = (0.85R_m - R_o) \times M \tag{3}$$

式中: $W$ 为有效拦蓄量(t/hm<sup>2</sup>); $R_m$ 为最大持水率(%); $R_o$ 为自然含水率(%); $M$ 为枯落物储量(t/hm<sup>2</sup>)。

### 3 结果与分析

#### 3.1 不同密度天然次生林枯落物蓄积量

枯落物蓄积量在一定程度上是枯落物输入量与分解量之间的平衡关系,枯落物的输入量与分解量则受到许多因素的影响,因此枯落物蓄积量是多种因子综合影响形成的结果,大致分为两类:其一为林分本身的特性,包括林分密度、树种组成、林木生长状况、林龄与林下灌草生长状况等;其二为林分所处的生态环境,包括温度、湿度、生长季节与人畜活动等。

由表 2 可知,5 种密度天然次生林未分解层厚度有

较大不同,范围为 9.65~20.45 mm,随着密度的增加厚度也呈现增大的趋势,但是在 930 株/hm<sup>2</sup> 增长到 1 190 株/hm<sup>2</sup> 时,枯落物厚度则是减小的,枯落物半分解层厚度、总厚度与之变化规律相同;枯落物未分解层厚度最大时,林分密度为 930 株/hm<sup>2</sup>,其厚度与密度为 280、520 株/hm<sup>2</sup> 林分枯落物厚度有较大的差异,与密度为 780、1 190 株/hm<sup>2</sup> 的林分差异性相对较小。枯落物半分解层厚度最大时,林分密度为 930 株/hm<sup>2</sup>,与其他密度林分枯落物半分解层厚度差异性较小;林分枯落物总厚度在 45.34~60.70 mm 浮动,最大值出现在林分密度为 900 株/hm<sup>2</sup> 的枯落物层。

表 2 不同密度天然次生林枯落物层蓄积量

编号	总厚度/ mm	总蓄积量/ (t·hm <sup>-2</sup> )	未分解层			半分解层		
			厚度/mm	蓄积量/(t·hm <sup>-2</sup> )	比例/%	厚度/mm	蓄积量/(t·hm <sup>-2</sup> )	比例/%
I	45.34	11.56	9.65	4.12	35.64	35.69	7.44	64.36
II	47.61	14.12	10.21	6.01	42.56	37.40	8.11	57.44
III	53.65	15.98	17.12	7.21	45.12	36.53	8.77	54.88
IV	60.70	19.64	20.45	9.71	49.44	40.25	9.93	50.56
V	53.80	16.77	18.22	8.01	47.76	35.58	8.76	52.24

不同密度天然次生林未分解层、半分解层与总蓄积量均随着密度从 280 株/hm<sup>2</sup> 增加到 930 株/hm<sup>2</sup> 时,其蓄积量均呈现增长趋势,而密度从 930 株/hm<sup>2</sup> 增大到 1 190 株/hm<sup>2</sup> 时,则均呈现减小的趋势,蓄积量的最大值均出现在林分密度为 930 株/hm<sup>2</sup> 时,而最小值则在密度为 280 株/hm<sup>2</sup> 时,两者差异性最大。总蓄积量大小排序为:930 株/hm<sup>2</sup>>1 190 株/hm<sup>2</sup>>780 株/hm<sup>2</sup>>520 株/hm<sup>2</sup>>280 株/hm<sup>2</sup>,枯落物蓄积量随着密度的增加呈先增大后减小的变化规律,这是由于密度的增长会减少林下的阳光,温度随之降低,从而降低了枯落物分解速度,从而有利于枯落物的积累,但是林分密度过大则会导致林分郁闭度增大,林木生长必需的养分与生长空间会出现供应不足的情况,林分内的林木之间竞争增强,而林木的新陈代谢减缓,不利于林下枯落物积累,因此枯落物出现减小的趋势。林分密度不同未分解层与半分解层蓄积量占总蓄积量的比例也不同,未分解层比例最高时,林分密度为 930 株/hm<sup>2</sup>,比例高达 49.44%,比例

最小的林分密度为 280 株/hm<sup>2</sup>,比例仅为 35.64%;分解层比例最高时,林分密度为 280 株/hm<sup>2</sup>,比例高达 64.36%,比例最小的林分密度为 930 株/hm<sup>2</sup>,比例仅为 50.56%,解层的比例不同主要是由于密度高的林分郁闭度与叶面积指数相对较高,导致地面光照不足,枯落物分解相对较慢。

不同密度天然次生林,由于林木株数、生长状况、林分所处生境均不同导致枯落物输入量与分解量有较大差异性,综合所述,不同密度天然次生林枯落物厚度和蓄积量表现出不同程度的差异性,但是根据以上数据分析知,林分密度处于 930 株/hm<sup>2</sup> 时,枯落物层厚度、蓄积量均最高,并且显著优于其他密度林分。

#### 3.2 不同密度天然次生林枯落物持水能力

3.2.1 枯落物最大持水量 林下枯落物不仅能够避免降雨对土壤的直接溅蚀,减少冲刷力,为土壤增加必需的有机质,还能够贮藏水分,具有较强的持水性,枯落物的持水量是反映林分水文生态效应的重要指标之一(表 3)。

表 3 不同密度天然次生林持水特征

编号	最大持水量/(t·hm <sup>-2</sup> )			最大持水率/%			最大持水深/mm		
	未分解层	半分解层	总和	未分解层	半分解层	总和	未分解层	半分解层	总和
I	7.21	16.05	23.26	175.00	215.73	195.36	0.72	1.61	2.33
II	10.88	17.88	28.76	181.03	220.47	200.75	1.09	1.79	2.88
III	13.28	20.12	33.40	184.19	229.42	206.80	1.33	2.01	3.34
IV	20.12	24.55	44.67	207.21	247.23	227.22	2.01	2.46	4.47
V	16.34	19.89	36.23	204.00	227.05	215.52	1.63	1.99	3.62

由表 3 可知,不同密度天然次生林最大持水量有

一定的差异性,未分解层变化范围为 7.21~20.12

t/hm<sup>2</sup>,大小排序为:930 株/hm<sup>2</sup>>1 190 株/hm<sup>2</sup>>780 株/hm<sup>2</sup>>520 株/hm<sup>2</sup>>280 株/hm<sup>2</sup>,总最大持水量变化规律与之相同,半分解层最大持水量变化范围为 16.05~24.55 t/hm<sup>2</sup>,大小排序为:930 株/hm<sup>2</sup>>780 株/hm<sup>2</sup>>1 190 株/hm<sup>2</sup>>520 株/hm<sup>2</sup>>280 株/hm<sup>2</sup>,由以上可知林分密度为 930 株/hm<sup>2</sup>时枯落物层总最大持水量最大(44.67 t/hm<sup>2</sup>),相当于 4.47 mm 水深,林分密度为 280 株/hm<sup>2</sup>时枯落物层总最大持水量最小(23.26 t/hm<sup>2</sup>),两者差距较大,主要是因为密度高林分枯落物层形成的蓄积量明显高于密度较小的林分。不同密度天然次生林未分解层最大持水率变化范围在 175.00%~207.21%,依次为 930 株/hm<sup>2</sup>>1 190 株/hm<sup>2</sup>>780 株/hm<sup>2</sup>>520 株/hm<sup>2</sup>>280 株/hm<sup>2</sup>,枯落物层平均最大持水率变化规律与之一致,半分解层最大持水率变化范围在 215.73%~247.23%,依次为 930 株/hm<sup>2</sup>>780 株/hm<sup>2</sup>>1 190 株/hm<sup>2</sup>>520 株/hm<sup>2</sup>>280 株/hm<sup>2</sup>,枯落物最大持水量与最大持水率变化规律一致;不论林分密度如何变化,枯落物半分解层最大持水量均高于未分解层最大持水量,说明半分解层持水性能高于未分解层,主要是因为枯落物经过分解后,半分解层与未分解层的组成结构有较大不同,半分解层的亲水面积要高于未分解层,有利于其进行持水。

3.2.2 枯落物有效拦蓄量 最大持水量反映了林分拦蓄潜力,降雨初期经过枯落物拦蓄后会慢慢下渗,

枯落物并不能长时间蓄积水分,除此以外该指标包含林分自然含水量,因此最大持水量反映出的拦蓄能力不能够代表林分真实拦蓄量,利用该指标代表林分拦蓄能力会导致结果偏高,因此一般采用有效拦蓄量来表达林分的拦蓄能力。

由表 4 可知,不同密度天然次生林枯落物拦蓄能力有一定的差异,未分解层最大拦蓄量变化范围为 6.71~17.99 t/hm<sup>2</sup>,大小排序为:930 株/hm<sup>2</sup>>1 190 株/hm<sup>2</sup>>780 株/hm<sup>2</sup>>520 株/hm<sup>2</sup>>280 株/hm<sup>2</sup>,半分解层最大拦蓄量变化范围为 14.44~21.57 t/hm<sup>2</sup>,大小排序为:930 株/hm<sup>2</sup>>780 株/hm<sup>2</sup>>1 190株/hm<sup>2</sup>>520 株/hm<sup>2</sup>>280 株/hm<sup>2</sup>,两个层次最大拦蓄量最大值均出现在密度为 930 株/hm<sup>2</sup>时,说明林分密度为 930 株/hm<sup>2</sup>时其拦蓄潜力最大;未分解层有效拦蓄量变化范围为 5.63~14.97 t/hm<sup>2</sup>,大小排序为:930 株/hm<sup>2</sup>>1 190 株/hm<sup>2</sup>>780 株/hm<sup>2</sup>>520 株/hm<sup>2</sup>>280 株/hm<sup>2</sup>,半分解层有效拦蓄量变化范围为 12.03~17.89 t/hm<sup>2</sup>,大小排序为:930 株/hm<sup>2</sup>>780 株/hm<sup>2</sup>>1 190 株/hm<sup>2</sup>>520 株/hm<sup>2</sup>>280 株/hm<sup>2</sup>,两个层次有效拦蓄量最大值均出现在密度为 930 株/hm<sup>2</sup>时,从枯落物两个层次有效拦蓄量分析,未分解层和半分解层均随着密度的增大呈现出先增加后减小的变化趋势。无论林分密度如何,半分解层最大拦蓄量与有效拦蓄量均高于未分解层,说明半分解层拦蓄能力更强,作用更大。

表 4 不同密度天然次生林枯落物拦蓄能力

枯落物层	编号	自然含水率/%	最大拦蓄率/%	最大拦蓄量/(t·hm <sup>-2</sup> )	有效拦蓄率/%	有效拦蓄量/(t·hm <sup>-2</sup> )	有效拦蓄深/mm
未分解层	I	12.14	162.86	6.71	136.61	5.63	0.56
	II	15.67	165.36	9.94	138.21	8.31	0.83
	III	18.91	165.28	11.92	137.65	9.92	0.99
	IV	21.97	185.24	17.99	154.16	14.97	1.50
	V	22.34	181.66	14.55	151.06	12.10	1.21
半分解层	I	21.67	194.06	14.44	161.70	12.03	1.20
	II	28.66	191.81	15.56	158.74	12.87	1.29
	III	29.88	199.54	17.50	165.13	14.48	1.45
	IV	30.02	217.21	21.57	180.13	17.89	1.79
	V	29.48	197.57	17.31	163.52	14.32	1.43

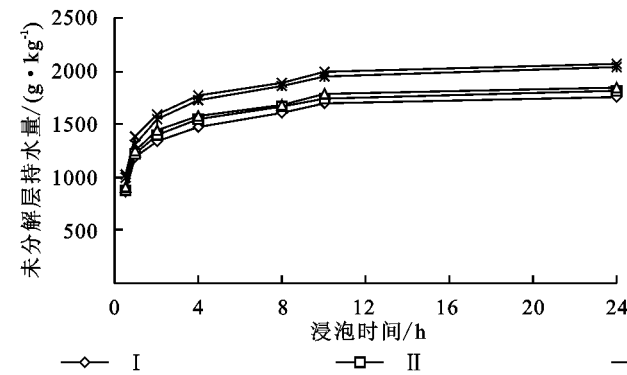
3.3 不同密度天然次生林枯落物持水过程分析

3.3.1 枯落物持水过程 由图 1 可知,5 种密度天然次生林枯落物未分解层、半分解层持水量变化趋势基本一致,枯落物在浸水刚开始的 1 h 内持水量增长迅速,持水量随之增大,随着时间的推移,持水量增长逐渐减小,在浸泡 12 h 时左右枯落物持水量基本达到饱和状态,不再增加,说明枯落物持水量与枯落物的蓄积量和干燥程度有关,枯落物蓄积量越大越干燥,

在一定时间内吸收的水分越多,持水过程与降雨过程中枯落物表现相同,即刚开始降雨时,枯落物吸收水分较强,拦蓄能力强,随着降雨的持续枯落物干燥程度越来越低,拦蓄能力开始减弱,最后趋于平缓达到最大持水量,与剪文灏等<sup>[18]</sup>研究枯落物持水过程规律一致。由曲线可以看出,未分解层密度 930 株/hm<sup>2</sup>与 1 190 株/hm<sup>2</sup>的林分枯落物持水量明显高于



其他 3 种密度林分,而半分解层密度 930 株/hm<sup>2</sup> 的林分枯落物持水量无论哪个时间段均高于其他 4 种密度林分,说明不同密度天然次生林枯落物持水能力



有一定的差距,但是半分解层持水量变化曲线除 930 株/hm<sup>2</sup> 外变化曲线基本都是重合的,说明这 4 种密度林分半分解层持水能力差异性较小。

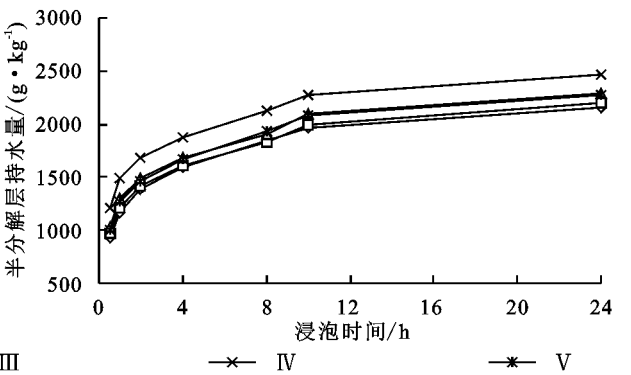


图 1 不同密度天然次生林枯落物持水量变化过程

对不同密度天然次生林未分解层、半分解层枯落物持水量与浸水时间进行函数关系拟合分析可知,两者存在较好的函数关系(表 5),具体表达式为:

$$Q=a\ln t+b$$
 (4)

式中:Q 为枯落物持水量(g/kg);t 为浸泡时间(h);a 为方程系数;b 为常数项。

表 5 不同密度天然次生林枯落物持水指标与时间拟合关系

枯落物层	编号	回归方程	R <sup>2</sup>	回归方程	R <sup>2</sup>
未分解层	I	$Q=224.42\ln t+1128.7$	0.9442	$V=1159.5t^{-0.900}$	0.9947
	II	$Q=234.37\ln t+1165.1$	0.9416	$V=1141.1t^{-0.825}$	0.9942
	III	$Q=233.91\ln t+1202.1$	0.9370	$V=1178.4t^{-0.830}$	0.9945
	IV	$Q=264.9\ln t+1337.6$	0.9480	$V=1312.5t^{-0.828}$	0.9950
	V	$Q=269.21\ln t+1288$	0.9625	$V=1265.2t^{-0.821}$	0.9959
半分解层	I	$Q=325.99\ln t+1161.2$	0.9954	$V=1145.8t^{-0.780}$	0.9982
	II	$Q=321.72\ln t+1192.9$	0.9952	$V=1182t^{-0.788}$	0.9988
	III	$Q=328.61\ln t+1266$	0.9913	$V=1254.9t^{-0.795}$	0.9987
	IV	$Q=327.39\ln t+1454$	0.9940	$V=1442.3t^{-0.818}$	0.9991
	V	$Q=332.61\ln t+1247.5$	0.9923	$V=1233.6t^{-0.791}$	0.9985

3.3.2 枯落物吸水速率 由图 2 可知,5 种不同密度天然次生林枯落物浸水后持水速率随着浸泡时间增长呈现一种下降的规律,即枯落物在浸水初期(1 h)持水速率下降非常快,在 4 h 左右下降速率放缓,12 h 左右趋于稳定,至 20 h 时趋于停止;5 种不同密度天然次生林枯落物持水速率相差较大,未分解层与半分解层持水速率也有一定的差异性,半分解层枯落物持水速率要大于未

分解层枯落物持水速率,可能是由于半分解层枯落物经过初步分解,已含有少量腐殖质,从而增强了半分解层枯落物的持水能力。通过对不同密度天然次生林枯落物两个层次与浸水时间进行函数关系拟合,两者具有较好的函数关系(表 5),表达式: $V=kt^n$ , $R>0.99$ ,式中:V 为枯落物吸水速率[g/(kg·h)];t 为浸泡时间(h);k 为方程系数;n 为指数。

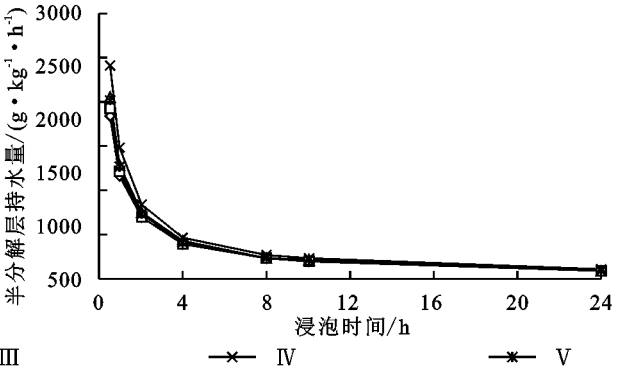
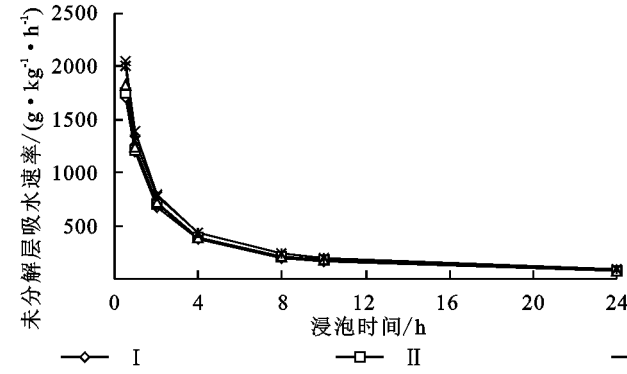


图 2 不同密度天然次生林枯落物吸水速率变化过程

## 4 讨论与结论

### 4.1 讨论

本研究表明不同密度天然次生林枯落物层总蓄积量随着林分密度增加呈现先增长后减小的变化规律,可能是由于随着林分密度的增长会减少林下的阳光,温度随之降低,从而降低了枯落物分解速度,从而有利于枯落物的积累,但是林分密度过大则会导致林分郁闭度增大,林木生长必需的养分与生长空间会出现供应不足的情况,林分内的林木之间竞争增强,而林木的新陈代谢减缓,不利于林下枯落物积累,因此枯落物出现减小的趋势,这与刘凯<sup>[19]</sup>、石媛<sup>[20]</sup>和周巧稚<sup>[21]</sup>等所研究的林分枯落物层蓄积量随林分密度的变化规律类似;研究中虽然进行室内浸泡试验在一定程度上呈现了枯落物拦蓄能力,但是枯落物层确切拦蓄能力仍需进行野外降雨测定试验来验证。

### 4.2 结论

(1) 林分枯落物总厚度在 45.34~60.70 mm 浮动,本研究表明不同密度天然次生林枯落物层总蓄积量依次排序为  $930 \text{ 株/hm}^2 > 1\,190 \text{ 株/hm}^2 > 780 \text{ 株/hm}^2 > 520 \text{ 株/hm}^2 > 280 \text{ 株/hm}^2$ ,即随着林分密度增加呈现先增长后减小的变化规律。综合所述,林分密度处于  $930 \text{ 株/hm}^2$  时,枯落物层厚度、蓄积量均最高,并且显著优于其他密度林分。

(2) 不同密度天然次生林最大持水量、最大持水率、有效拦蓄量与有效拦蓄率均有一定的差异性,枯落物层最大持水量变化范围为  $23.26 \sim 44.67 \text{ t/hm}^2$ ,最大拦蓄量变化范围为  $21.15 \sim 39.56 \text{ t/hm}^2$ ,有效拦蓄量变化范围为  $17.66 \sim 32.86 \text{ t/hm}^2$ ,大小排序均为:  $930 \text{ 株/hm}^2 > 1\,190 \text{ 株/hm}^2 > 780 \text{ 株/hm}^2 > 520 \text{ 株/hm}^2 > 280 \text{ 株/hm}^2$ ,均随着密度的增大呈现出先增加后减小的变化趋势,最大值均出现在密度为  $930 \text{ 株/hm}^2$  时;5 种密度天然次生林枯落物层持水量变化趋势为先增加后减小,通过对枯落物持水量、枯落物持水速率与浸水时间关系进行拟合分析发现,均存在较好的函数关系,分别符合对数函数与幂函数关系:  $Q = a \ln t + b (R^2 > 0.93)$ ,  $V = kt^n (R^2 > 0.99)$ ,这与赵阳<sup>[22]</sup>和吴迪<sup>[23]</sup>等研究结果相一致。

(3) 综合枯落物层持水能力与拦蓄能力可知,密度为  $930 \text{ 株/hm}^2$  的林分生态水文效应最强,而其他密度生态水文效应相对较差,密度小的林分是由于枯落物蓄积量较少造成其水源涵养能力较弱,因此,从增强该地区天然次生林水文生态效应与水源涵养的角度出发,建议在该地区内对不同密度的天然次生林进行有效的抚育措施来增加林分的水源涵养能力,从

而增强该地区水文生态效应与水源涵养功能。本研究虽然进行室内浸泡试验在一定程度上呈现了枯落物拦蓄能力,但是枯落物层确切拦蓄能力仍需进行野外降雨测定试验来验证,文中选择的林分密度梯度幅度偏大,试验条件允许时,仍需进一步细分。

### 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,2005,19(3):139-143.
- [3] 贺宇,丁国栋,梁文俊,等.林分密度对枯落物层持水特性的影响[J].西北农林科技大学学报:自然科学版,2012,40(4):68-72.
- [4] 陈莉莉,王得祥,张宋智,等.不同密度油松人工林土壤特性及水源涵养功能研究[J].西北农林科技大学学报:自然科学版,2013,41(7):141-149.
- [5] 田超,杨新兵,李军,等.冀北山地阴坡枯落物层和土壤层水文效应研究[J].水土保持学报,2011,25(2):97-103.
- [6] 杨振奇,秦富仓,李晓琴,等.砬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.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 卢振启,黄秋娟,杨新兵,等.河北雾灵山不同海拔油松人工林枯落物及土壤水文效应研究[J].水土保持学报,2014,28(1):113-116.
- [10] 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): 140-145,152.
- [11] 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.
- [12] 杨振奇,秦富仓,李晓琴,等.砬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.
- [13] 张引,张楠,梁文俊,等.接坝地区 6 种典型华北落叶松林分类型水源涵养功能[J].内蒙古农业大学学报:自然科学版,2019,40(2):26-31.
- [14] 陈波.北京八达岭石佛寺森林生态系统服务功能与健康研究[D].河北保定:河北农业大学,2013.
- [15] 鲁绍伟,陈波,潘青华,等.北京山地 7 种人工纯林枯落物及土壤水文效应[J].内蒙古农业大学学报:自然科学版,2013,34(5):53-59.
- [16] 陈波,杨新兵,赵心苗,等.冀北山地 6 种天然纯林枯落物及土壤水文效应[J].水土保持学报,2012,26(2): 196-202.

(6):16-19.

[27] Fu B J, Wang J, Chen L D, et al. The effects of land use on soil moisture variation in the Danangou catchment of the Loess Plateau, China [J]. Catena, 2003, 54(1/2):197-213.

[28] Hawley M E, Jackson T J, McCuen R H. Surface soil moisture variation on small agricultural watersheds [J]. Journal of Hydrology, 1983,62(1/4):179-200.

[29] Zhu Y J, Shao M A. Variability and pattern of surface moisture on a small-scale hillslope in Liudaogou catchment on the northern Loess Plateau of China [J]. Geoderma, 2008,147(3/4):185-191.

[30] 徐学选,刘文兆,高鹏,等.黄土丘陵区土壤水分空间分布差异性探讨[J].生态环境学报,2003,12(1):52-55.

[31] 莫保儒,王子婷,蔡国军,等.半干旱黄土区成熟柠条林地剖面土壤水分环境及影响因子研究[J].干旱区地理,2014,37(6):1207-1215.

[32] 张继光,陈洪松,苏以荣,等.喀斯特山区坡面土壤水分变异特征及其与环境因子的关系[J].农业工程学报,2010,26(9):87-93.

[33] 付国珍,摆万奇,姚丽娜.拉萨河流域耕地不同尺度土壤水分影响因子[J].应用生态学报,2015,26(7):2115-2122.

[34] 郭欣欣,付强,卢贺.东北黑土区农林混合利用坡面土壤水分空间异质性及主控因素[J].农业工程学报,2018,34(19):123-130.

[35] 姚雪玲,傅伯杰,吕一河.黄土丘陵区坡面尺度土壤水分空间变异及影响因子[J].生态学报,2012,32(16):4961-4968.

[36] 黄奕龙,陈利顶,傅伯杰,等.黄土丘陵小流域地形和土地利用对土壤水分时空格局的影响[J].第四纪研究,2003,23(3):334-342.

[37] 许德生.不同带间距柠条林根系和土壤水分特征及其植物多样性的研究[D].呼和浩特:内蒙古农业大学,2009.

[38] 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.

(上接第 45 页)

[8] 罗琰,苏德荣,纪宝明,等.辉河湿地不同草甸植被群落特征及其与土壤因子的关系[J].草业学报,2018,27(3):33-43.

[9] 孙千惠,吴霞,王媚臻,等.林分密度对马尾松林林下物种多样性和土壤理化性质的影响[J].应用生态学报,2018,29(3):732-738.

[10] 王合云,李红丽,董智,等.滨海盐碱地不同造林树种林地土壤盐碱化特征[J].土壤学报,2015,52(3):706-712.

[11] 夏江宝,陈印平,王贵霞,等.黄河三角洲盐碱地不同造林模式下的土壤碳氮分布特征[J].生态学报,2015,35(14):4633-4641.

[12] 王倩姿,王玉,孙志梅,等.腐植酸类物质的施用对盐碱地的改良效果[J].应用生态学报,2019,3(15):1-13.

[13] Wang W Q, Tong C, Jia R X, et al. Ecological stoichiometry characteristics of wetland soil carbon, nitrogen and phosphorus in different water-flooded frequency [J]. Journal of Soil & Water Conservation, 2010, 24(3): 238-242.

[14] 鲍士旦.土壤农化分析[M].3 版.北京:中国农业出版社,2013.

[15] 康健,孟宪法,许妍妍,等.不同植被类型对滨海盐碱土壤有机碳库的影响[J].土壤,2012,44(2):260-266.

[16] 董悦,张永清,刘彩彩.晋中市土壤养分空间分布与影响因子的相关性[J].生态学报,2018,38(23):8621-8629.

[17] 曾全超,李鑫,董扬红,等.陕北黄土高原土壤性质及其生态化学计量的纬度变化特征[J].自然资源学报,2015,30(5):870-879.

[18] 曾德慧,陈广生.生态化学计量学:复杂生命系统奥秘的探索[J].植物生态学报,2005,29(6):1007-1019.

(上接第 51 页)

[17] 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.

[18] 剪文灏,李淑春,陈波,等.冀北山区 3 种典型森林类型枯落物水文效应研究[J].水土保持研究,2011,18(5):144-147.

[19] 刘凯,贺康宁,王先棒,等.青海高寒区不同密度白桦林枯落物水文效应[J].北京林业大学学报,2018,40(1):89-97.

[20] 石媛,鲁绍伟,陈波,等.河北雾灵山不同密度油松人工林枯落物及土壤水文效应[J].水土保持学报,2014,28(3):92-97.

[21] 周巧稚,毕华兴,孔凌霄,等.晋西黄土区不同密度刺槐林枯落物层水文生态功能研究[J].水土保持学报,2018,32(4):115-121.

[22] 赵阳,余新晓,吴海龙,等.华北土石山区典型森林枯落物层和土壤层水文效应[J].水土保持学报,2011,25(6):148-152.

[23] 吴迪,辛学兵,赵明扬,等.北京九龙山不同林分枯落物及土壤水文效应[J].林业科学研究,2014,27(3):417-422.