

DOI: 10.5846/stxb202104160994

许小明, 邹亚东, 孙景梅, 田起隆, 贺洁, 何亮, 吕渡, 易海杰, 薛帆, 王浩嘉, 王妙倩, 冯学慧, 白云斌, 张晓萍. 黄土高原北洛河流域林地枯落物特征及水分吸持效应. 生态学报, 2021, 41(13): 5153-5165.

Xu X M, Zou Y D, Sun J M, Tian Q L, He J, He L, Lü D, Yi H J, Xue F, Wang H J, Wang M Q, Feng X H, Bai Y B, Zhang X P. Litter characteristics and water retention capacity in major forestland in the Beiluo River Basin of the Loess Plateau. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(13): 5153-5165.

黄土高原北洛河流域林地枯落物特征及水分吸持效应

许小明¹, 邹亚东¹, 孙景梅², 田起隆³, 贺洁¹, 何亮¹, 吕渡³, 易海杰³, 薛帆¹, 王浩嘉¹, 王妙倩¹, 冯学慧⁴, 白云斌⁵, 张晓萍^{1,3,*}

1 西北农林科技大学水土保持研究所, 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 杨陵 712100

2 国家林业和草原局 西北林业调查规划设计院, 旱区生态水文与灾害防治重点实验室, 西安 710048

3 中国科学院 水利部 水土保持研究所, 杨陵 712100

4 延安市吴起县吴起高级中学, 延安 717600

5 延安市吴起县吴起镇林业站, 延安 717600

摘要:明确黄土高原不同林分类型枯落物的时空变化特征,理解其水土保持功能,为流域土壤侵蚀模拟和预测提供基础数据和理论支撑。野外实测了北洛河流域内山杨、刺槐和沙棘 3 种人工林分以及乔木初期(白桦)、中期(辽东栎—油松混交林)、亚顶级(油松)和顶级(辽东栎)4 个次生演替阶段林分枯落物盖度、厚度和蓄积量。用浸泡法对枯落物持水能力和过程进行了研究。流域各林分类型枯落物厚度介于 4.55—1.38 cm,蓄积量介于 17.24—4.99 t/hm²,24 h 持水深和有效拦蓄深分别介于 2.73—0.96 mm 和 2.45—0.81 mm,表现为辽东栎—油松混交林>油松/辽东栎>山杨>刺槐>沙棘>白桦。枯落物持水量与浸泡时间存在对数函数关系($R^2 \geq 0.85$, $P < 0.01$),2 h 以内迅速增加,8 h 基本饱和。半分解层厚度、蓄积量、持水量和吸水速率均大于未分解层。流域内次生演替林分水分吸持能力和拦蓄作用总体上优于人工林分。植被演替过程中,辽东栎-油松混交林枯落物盖度、蓄积量和持水能力表现最优,建议在黄土高原造林及林地抚育管理过程中重视混交林的建设和保护。

关键词:林地枯落物;盖度和厚度;蓄积量;水分吸持效应;拦蓄作用;黄土高原

Litter characteristics and water retention capacity in major forestland in the Beiluo River Basin of the Loess Plateau

XU Xiaoming¹, ZOU Yadong¹, SUN Jingmei², TIAN Qilong³, HE Jie¹, HE Liang¹, LÜ Du³, YI Haijie³, XUE Fan¹, WANG Haojia¹, WANG Miaoqian¹, FENG Xuehui⁴, BAI Yunbin⁵, ZHANG Xiaoping^{1,3,*}

1 State Key Laboratory of Soil Erosion and Dry Land Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling 712100, China

2 Key Laboratory on Ecological Hydrology and Disaster Prevention in Arid Regions, Northwest Surveying, Planning and Designing Institute of National Forestry and Grassland Administration, Xi'an 710048, China

3 Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Science and Ministry of Water Resources, Yangling 712100, China

4 Wuqi Senior High School in Wuqi Town, Yan'an 717600, China

5 Forestry Station in Wuqi Town, Yan'an 717600, China

Abstract: The purpose of this study is to clarify the spatiotemporal variation characteristics of litter from different stand types on the Loess Plateau, which helps to deeply understand their soil and water conservation functions and also provides basic materials and theoretical support for soil erosion simulation and prediction in the watershed. Three types of planted

基金项目:国家自然科学基金资助项目(41877083,41440012,41230852)

收稿日期:2021-04-16; 修订日期:2021-07-01

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zhangxp@ms.iswc.ac.cn

stands, namely *Populus davidiana*, *Robinia pseudoacacia* and *Hippophae rhamnoides*, as well as four secondary successional stage stands including the early arbor (*Betula platyphylla*), middle arbor (*Quercus wutaishanica*-*Pine tabulaeformis* mixed forests), sub-top stage arbor (*Pine tabulaeformis*) and top stage arbor (*Quercus wutaishanica*) were selected for investigation on the coverage, the thickness and the water-holding capacity of litter in the Beiluo River Basin. The water-holding capacity and water absorption processes of litter were investigated by soaking method, a commonly used method in previous studies. The litter thickness from each stand type in the watershed ranged from 4.55 to 1.38 cm and the biomass from 17.24 to 4.99 t/hm². The water-holding depth and the effective interception depth at 24 h for litter from different stand types ranged from 2.73 to 0.96 mm and 2.45 to 0.81 mm, respectively. Litter from *Quercus wutaishanica*-*Pine tabulaeformis* mixed forests saw the highest value of the water-holding depth and the effective retention depth at 24 h, followed by that of *Pine tabulaeformis*/*Quercus wutaishanica*, *Populus davidiana*, *Robinia pseudoacacia*, *Hippophae rhamnoides* and *Betula platyphylla*. A logarithmic function could be used to represent the relationship between the water-holding capacity of litter and the soaking time ($R^2 \geq 0.85$, $P < 0.01$), showing that the water-holding capacity increased the most rapidly within 2 h and tended to be constant at 8 h. This suggests that forestland litter could play an important role in intercepting surface runoff from short-duration and high-intensity rainfall, which is prone to severe soil erosion. The thickness, biomass, water-holding capacity and water-absorbing rate of the semi-decomposed layer were all greater than those of the undecomposed layer. The water absorption capacity and interception performance of litter from the secondary successional stands in the basin were generally higher than that from the planted stands. Compared with the other vegetation succession stages, *Quercus wutaishanica*-*Pine tabulaeformis* mixed forests had the best performance in terms of litter coverage, biomass and water-holding capacity due to the optimal stand structure and stand density (1200—1600 trees /hm²). It is recommended to emphasize the construction and protection of mixed forests in afforestation plans and forest management on the Loess Plateau.

Key Words: forestland litter; coverage and thickness; biomass; water absorption capacity; interception performance; the Loess Plateau

在林地垂直结构分层中,枯枝落叶层减轻土壤侵蚀的意义甚至远大于林冠层和根系层^[1-4]。枯枝落叶层盖度和厚度是影响其发挥水土保持作用的两个主要因子^[5-6]。大量研究表明,当地表盖度达到60%—70%后,其控制水土流失的效果非常显著^[7-8]。当枯枝落叶层厚度达到1 cm以上,即使坡面林地砍伐后仍不会出现新的水土流失^[9-12]。近年来,国内学者对六盘山地区^[13-16]、黄龙山地区^[4,17]、山西西南部黄土区^[18-19]、黄土丘陵区^[20-24]、子午岭地区^[25-26]和高塬沟壑区^[27-28]不同林分类型枯落物的蓄积量和水土保持功能进行了系列研究,有助于明晰黄土高原不同地区林下枯落物的分布特征和减轻土壤侵蚀的重要作用。较为系统地研究、对比主要地貌类型区、不同演替阶段代表性林分条件下的枯落物盖度、厚度、蓄积量特征和相应的持水、拦蓄效应,可以促进对黄土高原半干旱、半湿润地区主要林地枯落物分布规律的深入认识,并深刻理解其持水能力和拦蓄径流的生态功能。

黄土高原地区侵蚀严重,水土流失剧烈,是我国生态恢复的重要关键带,退耕还林政策和天然林保护工程实施以来,植被得以快速恢复且生态成效显著^[29]。枯落物覆盖显著增加了地表糙度和改善了近地表土壤理化特征,吸持林内降雨、拦蓄地表径流,是土壤侵蚀过程及输移中的关键环节^[4]。枯落物层在很大程度上就是林地“拦蓄”功能的具体物质和结构化体现^[4]。为准确评估不同林分类型枯落物盖度和厚度随空间和演替阶段的变化规律,明晰植被恢复下地表枯落物的水土保持效益,本文以黄土高原北洛河流域为调查对象,野外实测了该流域丘陵沟壑区(暖温带森林草原带)、中游土石山区和高塬沟壑区(暖温带落叶阔叶林带)主要人工林分 and 不同次生演替阶段的典型林分类型枯落物盖度和厚度,估算了枯落物蓄积量并分析水分吸持过程,对深入理解区域水文循环和侵蚀调控的协同作用,进行水土流失过程定量模拟具有重要理论意义;基于研究区林分现实进行调查,对该地区植被恢复措施优化、生态保护和高质量发展具有实践指导意义。

1 研究区概况

研究区位于黄土高原腹地的北洛河流域上中游,海拔 583—1886 m(图 1)。属温带大陆性季风气候区,年降水量在 380—650 mm 之间,呈现出从西北向东南逐渐递增的空间变化趋势。降水主要集中在 6—9 月,多以暴雨形式出现^[30],流域多年平均输沙量高达 9.59×10^3 万 t。黄土丘陵沟壑区、土石山区与高原沟壑区分别约占流域面积的 26.9%、39.4% 和 19.7%。植被类型从西北向东南由中温带典型草原带逐渐过渡到暖温带森林草原带和森林带。主要土壤类型有黄绵土、灰褐土和黑垆土^[31]。1998 年以来,国家实施了大规模的退耕还林(草)政策以来,研究区所辖县域积极实施封山禁牧、植树种草和天然林保护工程,当地生态环境得到了显著改善。

丘陵沟壑区地形破碎,水土流失严重,常见人工造林树种有刺槐(*Robinia pseudoacacia*)、山杨(*Populus davidiana*)、山杏(*Prunus armeniaca*)、沙棘(*Hippophae rhamnoides*)和柠条(*Caragana korshinskii*)等;中游土石山区历经了 150 多年的自然恢复过程,植被覆盖度高,水土流失微弱,以天然次生林为主,主要林分类型为油松(*Pinus tabulaeformis*)、辽东栎(*Quercus wutaishanica*)、白桦(*Betula platyphylla*)、侧柏(*Platycladus orientalis*)、白刺花(*Sophora davidii*)、黄蔷薇(*Rosa hugonis*)、虎榛子(*Ostryopsis Decne*)和荆条(*Vitex negundo*)等^[32];高原沟壑区造林树种主要为刺槐和一些乔灌杂木,塬面与沟壑区转换处水土流失严重。

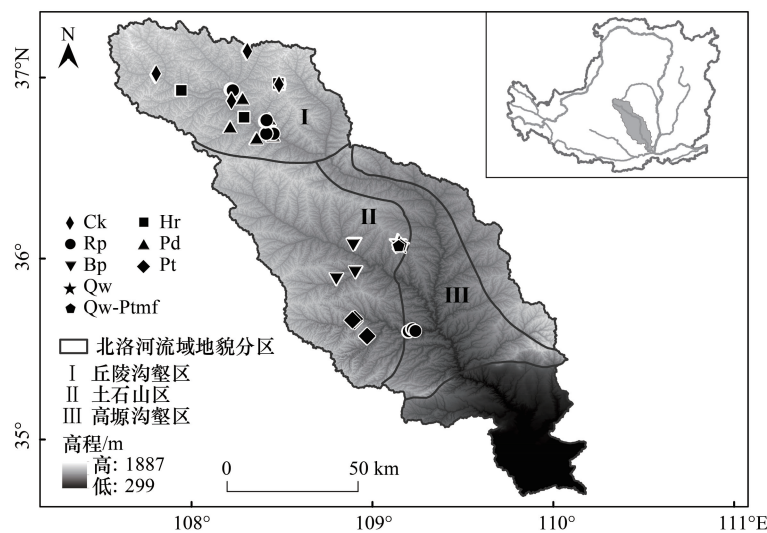


图 1 北洛河流域不同地貌类型区林地枯落物调查样点空间分布

Fig.1 The spatial distribution of surveyed sample sites of forestland litter in different geomorphic areas of the Beiluo River Basin

Ck: 柠条 *Caragana korshinskii*; Hr: 沙棘 *Hippophae rhamnoides*; Rp: 刺槐 *Robinia pseudoacacia*; Pd: 山杨 *Populus davidiana*; Bp: 白桦 *Betula platyphylla*; Pt: 油松 *Pinus tabulaeformis*; Qw: 辽东栎 *Quercus wutaishanica*; Qw-Ptmf: 辽东栎—油松混交林 *Quercus wutaishanica*-*Pinus tabulaeformis* mixed forests

2 研究方法

2.1 样地设置

研究区样地的设置,充分考虑了流域不同地貌类型分区并遵循坡面样地林分典型性原则。上游丘陵沟壑区主要退耕还林树种选取了柠条、沙棘、刺槐和山杨,分别约占区域林地面积的 23%、10%、11% 和 10%;中游土石山区依据植被次生演替规律^[32],确定了不同演替阶段的代表性植被类型,乔木演替初期、中期、亚顶级和顶级 4 个阶段的代表性树种分别为白桦、辽东栎—油松、油松和辽东栎,分别约占该区林地面积的 6%、4%、11% 和 45%;高原沟壑区沟坡选取的树种为刺槐,约占区域林地面积的 21%。

首先,结合流域内前期多次调查和访问,采样前借助影像和 ArcGIS 软件,初步选取了研究样地。经过前期勘察,分别于 2019 年 9—10 月和 2020 年 9 月对选取的人为干扰较少的 47 块坡位、坡度等立地条件基本一致,处于不同演替阶段的植被类型标准样地进行了基本群落特征调查。乔木样方为 20 m×20 m,灌木样方为 10 m×10 m。综合林分类型和林龄对 47 块样地进行归类整理,具体信息见图 1 和表 1。样地的经纬度、坡位、坡向和海拔等通过奥维地图软件获取,郁闭度和林分密度通过样线法实测。在标准样地内,每种乔木和灌木分别选取 3 个典型株,测量并记录树高、胸径(基径)等信息。文章在对比不同地貌区各林分类型时,采用了同一林分不同林龄数据平均值。在对比次生演替阶段时考虑了林龄变化。

表 1 北洛河流域典型林分类型样地基本信息

Table 1 The basic information of typical stand plots in the Beiluo River Basin

地貌类型 Geomorphological types	林分类型及样 地数量 Stand types and sites	坡位 Slope position	坡度 Slope/(°)	海拔 Elevation/m	郁闭度/盖度 Canopy density/ Coverage	林分密度 Stand density/hm ²	平均树高 Mean height/m	平均胸径(基径) Mean DBH (BD)/cm
丘陵沟壑区 Hilly-gully area	柠条(6块)	中上坡位	16°—35°	1 406—1 609	0.3—0.7	1 240—4 793	1.5—3.3	0.6—4.2
	沙棘(6块)	中坡位	14°—28°	1 405—1 625	0.7—0.85	6 000—12 000	1.8—2.3	5.8—12.4
	刺槐(7块)	中坡位	22°—24°	1 354—1 434	0.56—0.75	600—1 225	7.3—10	17.4—27.2
	山杨(6块)	中坡位	14°—31°	1 295—1 468	0.4—0.85	650—2 100	8.2—13.7	13.8—71
土石山区 Earth-rock mountain area	白桦(6块)	中坡位	19°—30°	1 030—1 131	0.53—0.81	1 289—6 563	10.7—13.9	9.4—16.1
	辽东栎-油松混 交林(3块)	中坡位	13°—25°	1 160—1 246	0.75—0.86	1 202—1 678	9.3—11.2	16.9—19.9
	油松(6块)	中坡位	23°—35°	1 096—1 122	0.78—0.83	1 224—3 112	12.3—22.5	15.1—32.8
	辽东栎(3块)	中坡位	16°—20°	1 146—1 240	0.71—0.83	1 211—1 696	12.4—13.4	10.8—24.2
高塬沟壑区 Table-gully area	刺槐(4块)	上坡位	21°—30°	996—1 180	0.66—0.82	1 124—2 397	4.3—8.8	5.6—10.7

Ck: 柠条 *Caragana korshinskii*; Hr: 沙棘 *Hippophae rhamnoides*; Rp: 刺槐 *Robinia pseudoacacia*; Pd: 山杨 *Populus davidiana*; Bp: 白桦 *Betula platyphylla*; Pt: 油松 *Pinus tabulaeformis*; Qw: 辽东栎 *Quercus wutaishanica*; Qw-Ptmf: 辽东栎—油松混交林 *Quercus wutaishanica*-*Pinus tabulaeformis* mixed forests; DBH: Diameter at Breast Height; BD: Basal diameter

2.2 枯落物盖度和厚度调查

在不同地貌类型区分别选取典型林分类型,在坡面植被长势较好,分布较为均匀的位置设置标准样地。所选样地基本保证中坡位,坡度介于 13°—35°,采用对角样线法按 1 m 间距对坡面标准样地地表盖度进行细致调查,记录沿线地表覆盖信息。枯落物盖度可通过记录为枯落物的样点数量与沿线所有调查样点数量的比值来计算。在标准样地内,随机选取 3 个枯落物小样方(31.7 cm×31.7 cm),依据未分解层和半分解层利用钢尺分别对其厚度进行测量和记录。

2.3 蓄积量测定

在标准样地随机选取的枯落物小样方内,按照未分解层和半分解层分别收集枯落物样品,装入已编号的塑封袋,带回室内称重,测定自然含水率,实验包括 3 次重复。然后将枯落物样品平铺放置在室内通风处,自然风干 3 天后再次称重,即可计算各林分类型单位面积内枯落物的蓄积量(t/hm^2)。

2.4 持水能力、持水过程及吸水速率

2.4.1 持水能力

将阴干、称重后的枯落物样品,装入孔隙为 1 mm×1 mm 的尼龙网袋中,将其置入盛有清水的容器内,为保证样品充分浸泡,纱网应完全被容器内水面覆盖。在浸泡时长为 5 min、10 min、20 min、30 min、45 min、1 h、2 h、4 h、8 h、12 h 和 24 h 时,将样品从容器内依次取出、悬挂、抖水、静置直至无重力水滴落为止,然后迅速称重并记录。每次取出样品称重、记算得到的样品含水重为从第一次浸泡到该次浸泡时长条件下的枯落物总持水量,前后两次枯落物持水量的差值即为该次浸泡吸水量。枯落物的吸水速率为前后两次枯落物的吸水量与吸水时间间隔的比值。为减少实验误差,每张尼龙网袋使用前,须测定其最大持水量。据已有研究表明,样品

一般在浸泡 24 h 时重量达到最大值^[14,33],文章中最大持水量通过浸泡 24 h 时的持水量来反映。

据文献[34],当场次降雨量达到大雨量级即 20—30 mm 时,85%的枯落物最大持水率与有效拦蓄率基本一致,本研究采用这一研究成果来估算林地不同林分枯落物的有效拦蓄量,实质上估算的是由枯落物生物特性决定的持水能力。枯落物的持水能力通过浸泡 24 h 时的持水量(W_{24m})、持水率(R_{24m})、有效拦蓄量(W_{24av})和有效拦蓄率(R_{24av})等指标表现出来。公式如下:

$$W_{24m} = W_{24} - W_0 \quad (1)$$

$$R_{24m} = \frac{W_{24} - W_0}{W_0} \times 100\% \quad (2)$$

$$R_{24av} = 0.85 \times R_{24m} - R_0 \quad (3)$$

$$W_{24av} = R_{24av} \times W_0 \quad (4)$$

式中, W_{24m} 为浸泡 24 h 时的持水量(t/hm^2), W_{24} 为 24 h 时的枯落物重量(t/hm^2), W_0 为枯落物阴干重(t/hm^2), R_{24m} 为 24 h 时的持水率(%), R_{24av} 为 24 h 时的有效拦蓄率(%), R_0 为枯落物雨前自然含水率(%), W_{24av} 为 24 h 时的有效拦蓄量(t/hm^2)。

2.4.2 持水过程

林分枯落物持水量与浸泡时间存在如下关系^[16]:

$$Q = a \ln(t) + b \quad (5)$$

式中, Q 为枯落物持水量(t/hm^2), t 为浸泡时间(h), a 为方程系数, b 为方程常数项。

2.4.3 吸水速率

林分枯落物吸水速率与浸泡时间存在指数关系^[34],如下:

$$V = kt^n \quad (6)$$

式中, V 为枯落物吸水速率($t \cdot hm^{-2} \cdot h^{-1}$), t 为浸泡时间(h), k 为方程系数, n 为指数。

2.5 数据处理

利用 Microsoft Excel 2010 对数据进行处理,采用 One-Way ANOVA 法和最小显著差异法(LSD)检验不同林分类型以及同一林分不同林龄样地的枯落物在厚度、盖度、蓄积量和持水能力等方面的差异($\alpha=0.05$)。分别对各分层枯落物的持水能力、吸水速率与浸泡时间进行回归分析,并对方程进行显著性检验($P<0.01$ 指极显著相关)。使用 Origin 8.6 软件绘图。

3 结果与分析

3.1 枯落物盖度和厚度

枯落物盖度方面,流域内所有人工和自然演替林分均高于 90%,各林分之间差异不显著($P>0.05$)。人工林分总体稍低于次生演替林分,柠条枯落物盖度最小(92%),辽东栎—油松混交林最大(100%)。

枯落物厚度方面,各林分类型厚度介于 4.55—1.38 cm,均值为 3.18 cm,未分解层厚度均小于半分解层。人工乔木林地总体大于灌木林地,灌木林地中沙棘显著大于柠条($P<0.05$) (图 2)。土石山区林地由白桦演替到辽东栎,相应地枯落物厚度总体表现为增加的变化趋势,辽东栎和油松枯落物厚度最大,白桦与油松、辽东栎差异显著($P<0.05$)。调查发现同一林分随林龄增加,枯落物也呈现出增厚的态势(图 3)。

3.2 枯落物蓄积量

流域各林分类型枯落物蓄积量表现为辽东栎—油松混交林>油松/辽东栎>山杨>刺槐>沙棘>白桦,次生演替林分平均蓄积量是人工林分的 1.41 倍,人工乔木林分是灌木的 1.21 倍。总体来看,次生演替林分和人工林分差异较大(图 4,5)。

从演替阶段来看,土石山区乔木全演替序列中典型林分枯落物蓄积量差异较大,在 17.24—4.99 t/hm^2 之间,均值为 9.58 t/hm^2 。辽东栎—油松混交过熟林和油松中龄林蓄积量最大,为 17.24 t/hm^2 ;白桦近熟林最

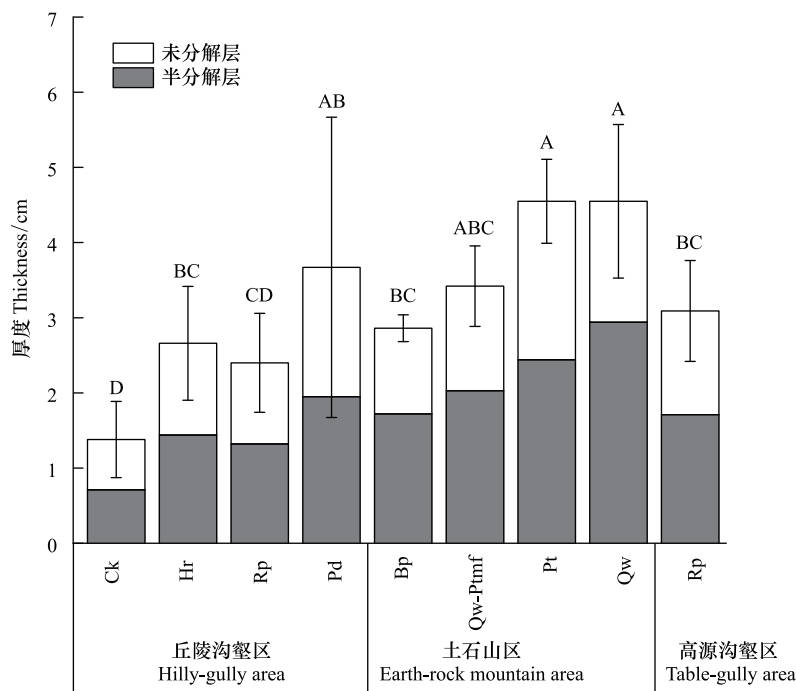


图2 北洛河流域主要林分类型枯落物厚度

Fig.2 The litter thickness of typical stand types in the Beiluo River Basin

低,为 4.99 t/hm^2 。不同林龄白桦枯落物蓄积量增加缓慢,从白桦过熟林到辽东栎—油松混交林阶段,蓄积量增加最为明显 ($P < 0.05$),辽东栎—油松混交林蓄积量达到峰值,之后波动下降(图5)。研究表明,各林分类型枯物厚度与蓄积量具有显著正相关关系 ($R^2 = 0.44, P < 0.05$)。

枯落物组层方面,研究区典型林分类型枯落物未分解层蓄积量均小于半分解层(图4,5)。不同林分对比来看,油松未分解层蓄积量约占总蓄积量的41%,而辽东栎最低,为13%,这主要是由于油松枯落物叶片富含木质素导致比辽东栎分解速率较慢(图5)。

3.3 枯落物持水能力

枯落物持水能力与林分类型、蓄积量和枯落物组成等密切相关。从表2可以看出,流域内各林分类型之间枯落物24 h持水率、24 h持水量(深)和有效拦蓄量(深)差异较大。不同林分按各分层枯落物蓄积量占比加权平均后,24 h持水率表现为油松>刺槐>辽东栎—油松混交林>白桦>沙棘>辽东栎>山杨。未分解层持水能力总体小于半分解层,其24 h持水率分别介于218.87%—127.14%和246.26%—141.20%。各林分枯落物24 h持水深介于2.73—0.96 mm,辽东栎—油松混交林持水深最大,白桦林最小,二者差异显著 ($P < 0.05$)。不同林分枯落物24 h持水深呈现出辽东栎—油松混交林>油松/辽东栎>山杨>刺槐>沙棘>白桦。有效拦蓄深反映了枯落物对降雨的可能拦蓄值,各林分枯落物有效拦蓄深介于2.45—0.81 mm(表2),拦蓄深次序与最大持水深一致。

表3表明土石山区不同演替阶段典型林分枯落物未分解层持水能力总体小于半分解层,其24 h持水率分别介于209.13%—151.82%和218.71%—164.06%。从白桦演替到辽东栎,24 h持水率整体呈增大趋势。从白桦近熟林到过熟林,24 h持水深和有效拦蓄深增加不明显。与蓄积量变化规律一致,24 h持水深和有效拦蓄深均表现为从白桦到辽东栎—油松混交林显著增加 ($P < 0.05$) 并达到峰值,之后波动下降,油松和辽东栎基本持平的变化特征。林龄尺度上,辽东栎—油松混交过熟林24 h持水深和有效拦蓄深最高。

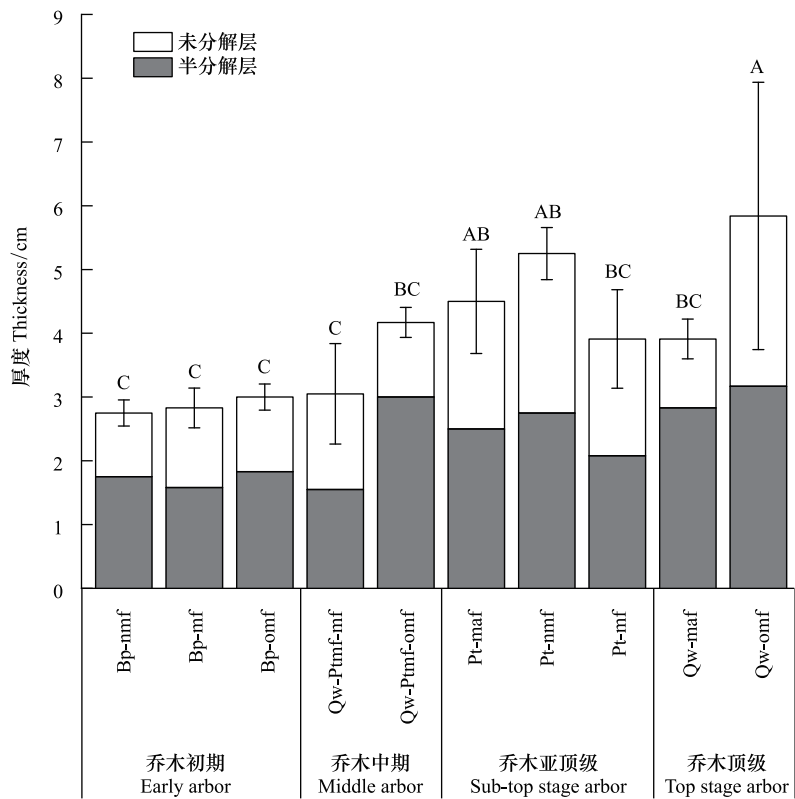


图3 土石山区不同演替阶段典型林分类型枯落物厚度

Fig.3 The litter thickness of typical stand types in different succession stages of earth-rock mountain area

Bp-nmf: 白桦近熟林(41—50 年) *Betula platyphylla* near-mature forest (41—50 ages); Bp-mf: 白桦成熟林(51—60 年) *Betula platyphylla* mature forest (51—60 ages); Bp-omf: 白桦过熟林(>60 年) *Betula platyphylla* over-mature forest (Over 60 ages); Qw-Ptmf-mf: 辽东栎—油松混交成熟林(51—60 年) *Quercus wutaishanica*-*Pinus tabulaeformis* mixed mature forest (51—60 ages); Qw-Ptmf-omf: 辽东栎—油松混交过熟林(>60 年) *Quercus wutaishanica*-*Pinus tabulaeformis* mixed over-mature forest (Over 60 ages); Pt-maf: 油松中龄林(21—40 年) *Pinus tabulaeformis* middle-aged forest (21—40 ages); Pt-nmf: 油松近熟林(41—50 年) *Pinus tabulaeformis* near-mature forest (41—50 ages); Pt-mf: 油松成熟林(51—70 年) *Pinus tabulaeformis* mature forest (51—70 ages); Qw-maf: 辽东栎中龄林(21—40 年) *Quercus wutaishanica* middle-aged forest (21—40 ages); Qw-omf: 辽东栎过熟林(>60 年) *Quercus wutaishanica* over-mature forest (Over 60 ages)

表2 北洛河流域典型林分类型枯落物持水能力

Table 2 The water-holding capacity of litter layer of typical stand types in the Beiluo River Basin

地貌类型 Geomorphological types	林分类型 Stand types	24 h 持水率 The water-holding rate at 24 h/%		24 h 持水量 The water-holding capacity at 24 h		24 h 有效拦蓄量 The effective interception capacity at 24 h	
		未分解层 Undecomposed layer	半分解层 Semi-decomposed layer	未分解层 Undecomposed layer	半分解层 Semi-decomposed layer	未分解层 Undecomposed layer	半分解层 Semi-decomposed layer
丘陵沟壑区 Hilly-gully area	沙棘 Hr	218.87	141.20	5.80/0.58	6.10/0.61	4.93/0.49	5.19/0.52
	刺槐 Rp	235.00	160.62	5.64/0.56	10.81/1.08	4.79/0.48	9.19/0.92
	山杨 Pd	127.14	168.39	4.17/0.42	12.73/1.27	3.54/0.35	10.82/1.08
土石山区 Earth-rock mountain area	白桦 Bp	157.98	185.02	1.88/0.19	7.66/0.77	1.60/0.16	6.51/0.65
	辽东栎-松混交 林 Qw-Ptmf	182.08	184.39	6.30/0.63	21.02/2.10	5.36/0.54	17.87/1.78
	油松 Pt	175.78	246.26	8.42/0.84	16.10/1.61	7.16/0.72	17.33/1.73
	辽东栎 Qw	174.84	161.65	2.78/0.28	20.39/2.04	2.36/0.24	13.69/1.37
高原沟壑区 Table-gully area	刺槐 Rp	139.07	203.08	1.14/0.11	8.28/0.83	0.97/0.10	7.04/0.70

数据单位是:分子:t/hm², 分母:mm

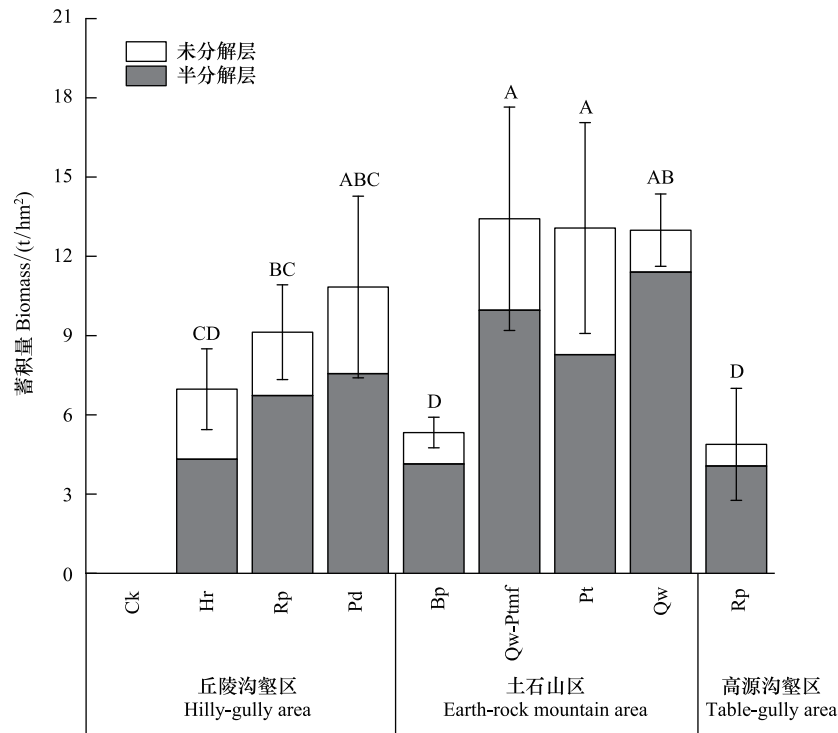


图 4 北洛河流域主要林分类型枯落物蓄积量

Fig.4 The litter biomass of typical stand types in the Beiluo River Basin

表 3 土石山区不同演替阶段典型林分类型枯落物持水能力

Table 3 The water-holding capacity of litter layer of typical stand types in different succession stages of earth-rock mountain area			24 h 持水率 The water-holding rate at 24 h/%		24 h 持水量 The water-holding capacity at 24 h		24 h 有效拦蓄量 The effective interception capacity at 24 h	
演替阶段 Succession stages	林分类型 Stand types	林龄 Forest age	未分解层 Undecomposed layer	半分解层 Semi-decomposed layer	未分解层 Undecomposed layer	半分解层 Semi-decomposed layer	未分解层 Undecomposed layer	半分解层 Semi-decomposed layer
乔木初期 Early arbor	白桦 Bp	近熟林(41—50 年)	151.82	174.42	1.04/0.10	7.5/0.75	0.88/0.09	6.38/0.64
		成熟林(51—60 年)	170.90	176.73	2.29/0.23	7.07/0.71	1.95/0.20	6.01/0.60
		过熟林(60 年以上)	149.56	204.04	2.32/0.32	8.41/0.84	1.97/0.20	7.15/0.72
乔木中期 Middle arbor	辽东栎-油松混交林 Qw-Ptmf	成熟林(51—60 年)	170.47	218.15	6.22/0.62	17.13/1.71	5.29/0.53	14.56/1.46
		过熟林(60 年以上)	209.13	203.50	6.46/0.65	28.82/2.88	5.49/0.55	24.49/2.45
乔木亚顶级 Sub-top stage arbor	油松 Pt	中龄林(21—40 年)	154.60	188.50	10.93/1.09	19.17/1.92	9.29/0.93	16.29/1.63
		近熟林(41—50 年)	201.25	218.71	8.63/0.86	11.94/1.19	7.34/0.73	10.15/1.02
		成熟林(51—70 年)	189.53	187.09	5.71/0.57	17.19/1.72	4.85/0.49	14.61/1.46
乔木顶级 Top stage arbor	辽东栎 Qw	中龄林(21—40 年)	176.59	185.80	2.44/0.24	21.52/2.15	2.07/0.21	18.29/1.83
		过熟林(60 年以上)	171.80	164.06	3.47/0.35	18.13/1.81	2.95/0.30	15.41/1.54

3.4 枯落物持水过程

各林分类型枯落物持水量与浸泡时间存在对数函数关系($P<0.01$)。2 h 以内持水量迅速增加,随浸泡时间延长,持水量增加逐渐变缓,8 h 基本达到饱和(图 6,7)。总体来看,流域次生演替林分枯落物持水量优于人工林分,半分解层大于未分解层。乔木演替过程中,辽东栎—油松混交过熟林枯落物持水量最大,持水量从大到小表现为辽东栎—油松混交过熟林>油松中龄林>辽东栎中龄林>白桦近熟林。相关性分析表明,各林分

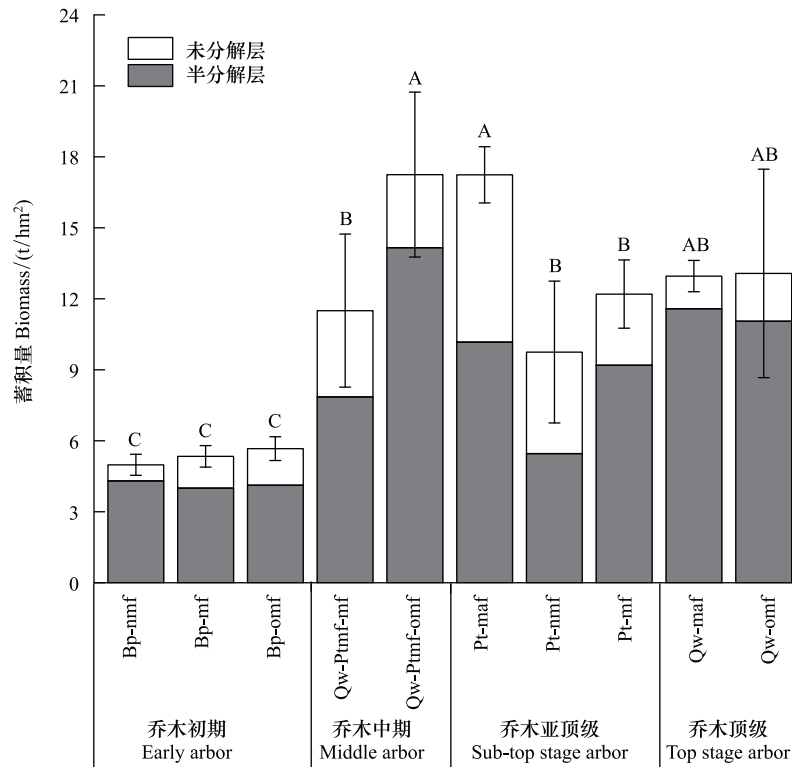


图5 土石山区不同演替阶段典型林分类型枯落物蓄积量

Fig.5 The litter biomass of typical stand types in different succession stages of earth-rock mountain area

类型枯落物蓄积量与 24 h 最大持水量呈显著相关 ($R^2=0.86, P<0.05$)。

各林分类型枯落物吸水速率与浸泡时间呈幂函数关系 ($P<0.01$), 如图 8, 9 所示。初始浸泡 5 min 时, 吸水速率最大, 0.5 h 以内吸水速率递减变化明显, 之后则基本趋近于 0。人工林分吸水速率总体小于次生演替林分, 未分解层小于半分解层 (图 8)。土石山区乔木不同演替阶段主要林分枯落物吸水速率差异较大, 尤其体现在前 5 min。辽东栎—油松混交过熟林枯落物半分解层吸水速率最高, 白桦近熟林最低, 二者相差 3 倍左右。油松和辽东栎半分解层吸水速率基本在 $130\text{--}140\text{ t hm}^{-2}\text{ h}^{-1}$ (图 9)。

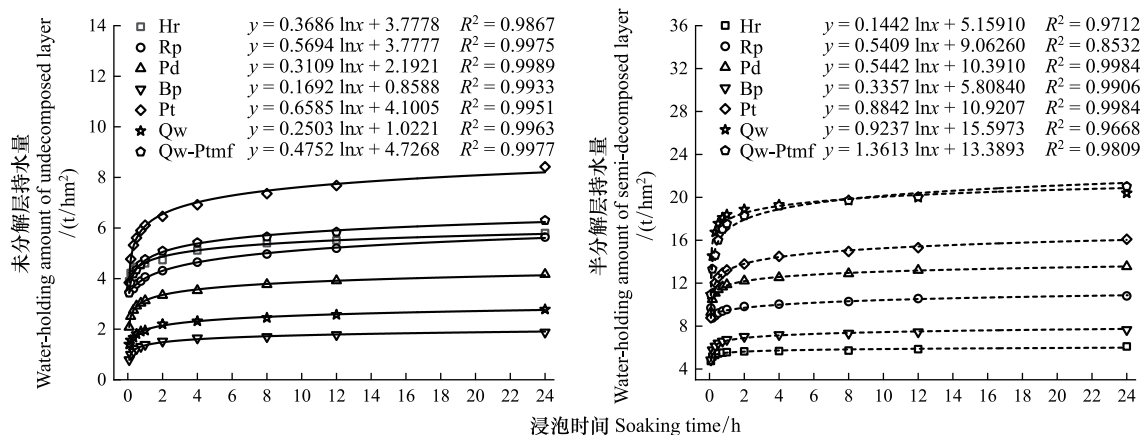


图6 北洛河流域主要林分类型枯落物未分解层和半分解层持水过程

Fig.6 The water-holding precess of litter undecomposed layer and semi-decomposed layer for typical stand types in the Beiluo River Basin

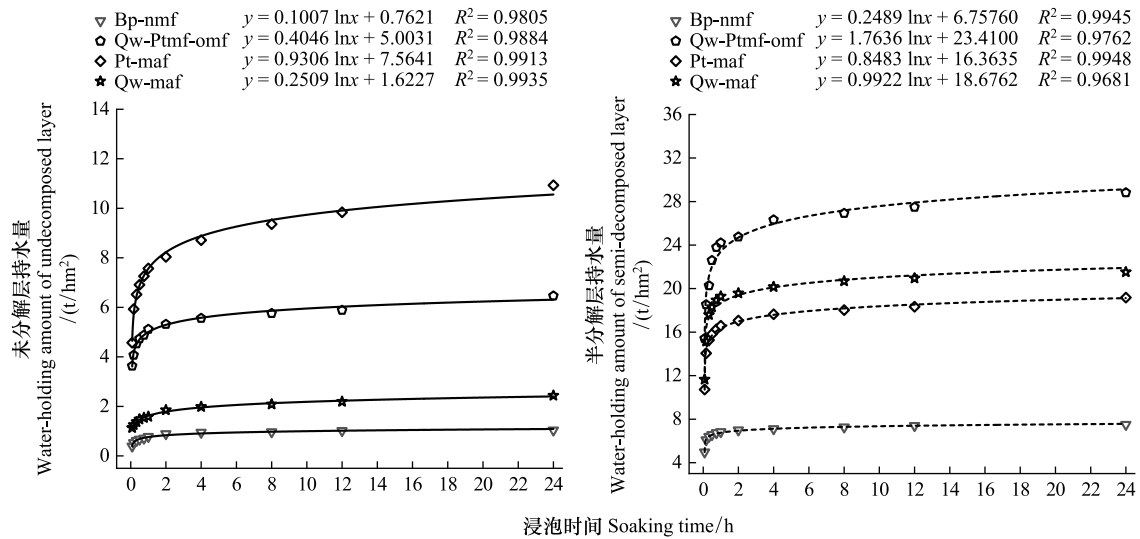


图7 土石山区不同演替阶段典型林分类型枯落物未分解层和半分解层持水过程

Fig.7 The water-holding precess of litter undecomposed layer and semi-decomposed layer for typical stand types in different succession stages of earth-rock mountain area

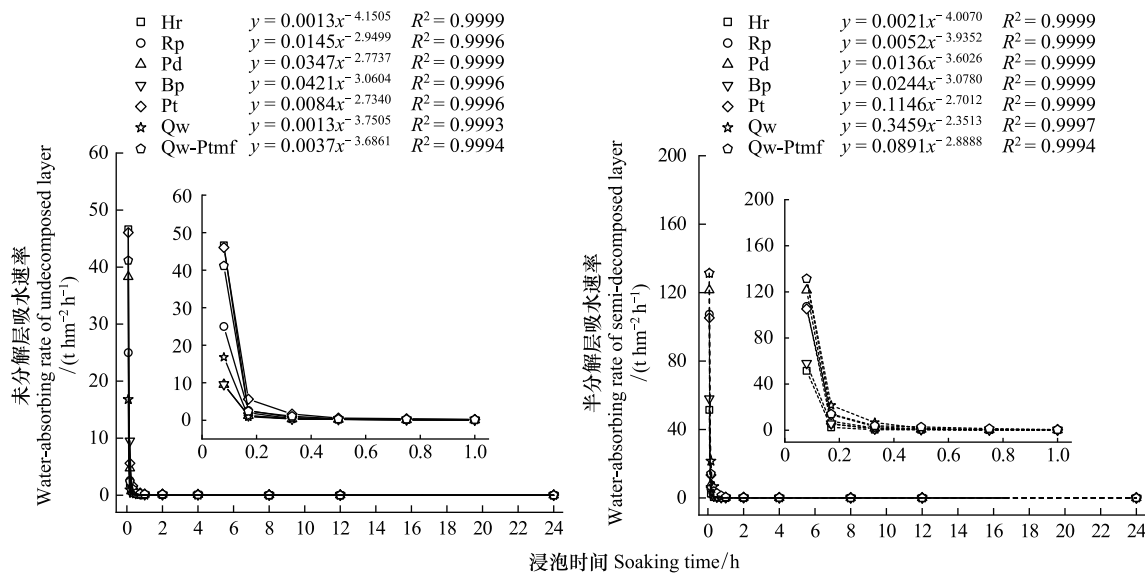


图8 北洛河流域主要林分类型枯落物未分解层和半分解层吸水速率

Fig.8 The water-absorbing rate of litter undecomposed layer and semi-decomposed layer for typical stand types in the Beiluo River Basin

4 讨论

4.1 林地枯落物盖度和厚度调查的意义

黄土高原地区林地土壤溅蚀量通常发生在7—8月,约占全年总溅蚀量的60%以上。枯落物作为林地主要的地被物层,对消减土壤溅蚀、保护表土结构、拦蓄地表径流和控制土壤侵蚀具有重要作用^[2-4]。研究发现,北洛河流域主要调查林分类型枯落物盖度和厚度均超过发挥水土保持作用的地表盖度(60%—70%)和有效厚度(1 cm)。枯落物覆盖是土壤侵蚀过程及输移中的关键环节,研究与探讨该区主要林分类型枯落物盖度、厚度、水分吸持和拦蓄效应,有利于更精准地理解和评价人工林分 and 不同次生演替林分类型枯落物的水土

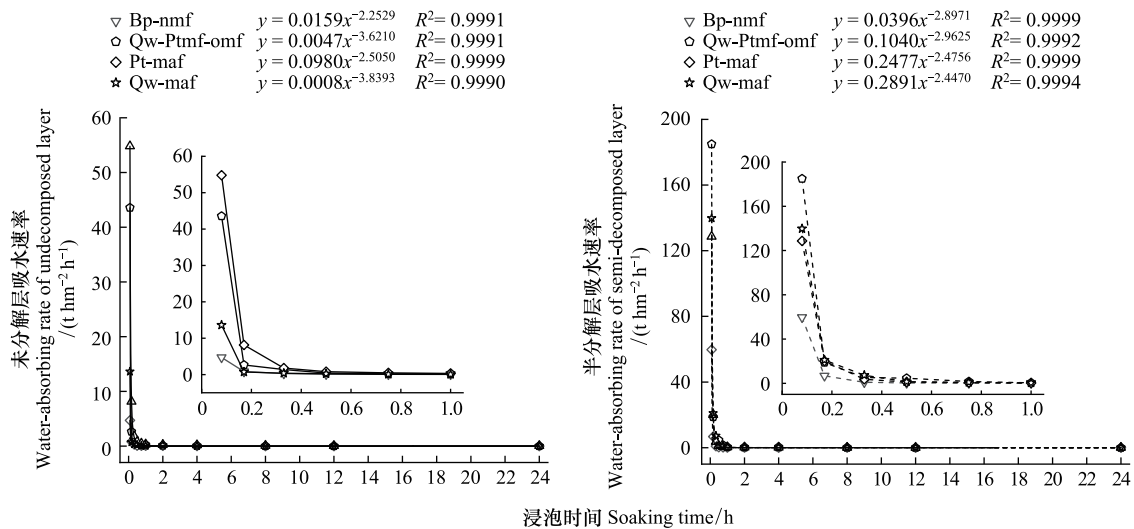


图9 土石山区不同演替阶段典型林分类型枯落物未分解层和半分解层吸水速率

Fig.9 The water-absorbing rate of litter undecomposed layer and semi-decomposed layer for typical stand types in different succession stages of earth-rock mountain area

保持效益。野外调查获取的不同林分类型枯落物盖度和厚度资料,是课题后续研究土地利用和植被覆盖变化对水土流失影响的前期基础性工作,能够为流域土壤侵蚀评估和定量预测提供基础数据支撑,提高模型模拟精度;有助于深入理解土壤侵蚀机制,为黄土高原其他在气候和植被类型相似的区域提供一定的参考。此外,鉴于枯落物盖度和厚度在水土保持中的重要意义,未来林地经营和抚育管理过程中应注重树种合理配置^[35],减少人为扰动对林下地被物层的影响。

4.2 林分类型对枯落物特征、水分吸持和拦蓄效应的影响

林分类型的差异主要受水热条件和演替过程的影响。从水热条件来看,北洛河流域属于暖温带,全区热量差异较小。丘陵沟壑区和土石山区多年平均降水量分别为470 mm和575 mm。降水量南北差异较大,很大程度上影响了流域主要林分类型、枯落物特征以及水土保持效应的空间变化^[36]。研究表明,土石山区不同次生演替阶段林分枯落物厚度、蓄积量及其持水能力较丘陵沟壑区人工林分分别提高了52.1%、24.8%和33%。降水是限制丘陵沟壑区人工林分枯落物蓄积量及其水土保持功能的关键因子。沙棘和柠条是丘陵沟壑区最主要的灌木群落,该区内部由于降水量的空间差异以及微地形引起的水分分异,致使以刺槐和山杨为主的人工乔木群落枯落物厚度、蓄积量及其持水能力是灌木群落的1.5倍左右(图2、图4和表2),这与汪建芳等^[37]的研究结果基本相符。但沙棘和柠条林地枯落物盖度调查结果与杨寒月等^[23]的研究差异较大,可能受调查样地的立地条件和微地形引起的水热条件等因素影响。以往研究^[4]表明,黄土高原主要森林类型枯落物对林内降水的平均年截留量和截留率分别为43.7 mm和12.6%,枯落物吸持和拦蓄的水分相对于降水总量来讲,其占比不容忽视。不同林分类型的枯落物均表现为2 h以内持水量增加最为迅速,枯落物有效吸持、拦蓄容易引起水土流失的短历时、高强度的降雨径流,降低它对土壤的冲刷力和携沙力。

从植被演替角度来看,邹厚远等^[32]认为,子午岭北部土石山区从白桦演替到辽东栎大约需要70—80年。本研究发现,乔木4个次生演替序列中主要林分类型枯落物盖度均在94%以上,随时间变化不明显,表明枯落物盖度在白桦林阶段处于稳定高覆盖水平,能够有效发挥减轻土壤侵蚀的作用。随着植被不断演替,枯落物越厚,相应地蓄积量和持水能力总体呈现出增加的变化趋势^[25,38-40]。土石山区不同演替阶段林地枯落物厚度和蓄积量等特征,与程积民等^[25]的研究结果基本一致。从白桦演替到辽东栎—油松混交林,尽管枯落物厚度由3 cm增加到3.61 cm,但蓄积量和持水量增加更为迅速,辽东栎—油松混交林为白桦林的3倍左右,这主要受枯落物密度和孔隙结构的影响^[22]。辽东栎—油松混交林林分包括了复合林层结构,林分密度最优(1200—

1600 株/hm²), 枯落物蓄积量最大, 枯落物分解速率适中, 因此水分吸持效应在该阶段达到峰值^[15,40-41], 与侯贵荣^[28]得出的混交林具有最优的涵养水源能力结论相符。最优的林分密度可能受林分类型及所在区域水热条件的综合影响, 从而表现出不一致性^[42]。演替亚顶级阶段油松与气候顶级阶段辽东栎在枯落物厚度、蓄积量和水分吸持效应等方面基本相同, 说明随植被演替林分类型变化对枯落物减轻土壤侵蚀作用的影响在该阶段基本达到稳定水平。林龄尺度上, 辽东栎-油松混交过熟林和油松中龄林是枯落物蓄积量和水土保持作用最强的林分类型。从白桦近熟林到过熟林, 枯落物特征、水分吸持和拦蓄功能无显著变化, 说明林龄变化对白桦林枯落物的影响不明显。辽东栎-油松混交林和辽东栎随林龄增加, 枯落物蓄积量和 24 h 拦蓄深等呈增加趋势。随林龄变化油松林地枯落物厚度、蓄积量和水土保持功能波动较大, 这可能受林分密度不同的影响。不同林分类型枯落物吸持水量存在倍数差异, 表明正向演替过程的发生, 有利于林分更替、枯落物积累以及更为有效地发挥水土保持作用。

5 结论

黄土高原北洛河流域主要调查林分类型枯落物枯落物厚度、蓄积量、24 h 持水深和有效拦蓄深表现为辽东栎-油松混交林>油松/辽东栎>山杨>刺槐>沙棘>白桦。枯落物持水量在 2 h 以内迅速增加, 8 h 基本饱和。半分解层厚度、蓄积量、持水量和吸水速率均大于未分解层。流域内次生演替林分水分吸持能力总体上优于人工林分, 植被恢复生态成效显著。

植被次生演替过程中辽东栎-油松混交林、油松和辽东栎的水土保持效应较好, 未来黄土高原地区因地制宜造林及林地抚育管理过程中应重视这些林分的建设。注重人工林的近自然经营, 优化林分结构和功能, 合理调整林分密度, 加强对林地枯落物的保护和监管。降水条件是限制丘陵沟壑区人工林地枯落物蓄积量和水土保持功能的关键因子, 因此该区造林过程中应科学考虑土壤水分植被承载力, 乔灌做到合理配置。枯落物 2 h 以内持水量迅速增加, 表明黄土高原地区随着植被的不断恢复和持续演替, 林地枯落物对拦蓄容易引起水土流失的短历时、高强度的降雨径流, 发挥水源涵养具有重要作用。

参考文献 (References):

- [1] 朱显谟. 黄土地区植被因素对于水土流失的影响. 土壤学报, 1960, 8(2): 110-121.
- [2] Lowdermilk W C. Influence of forest litter on runoff, protection, and erosion. Journal of Forestry, 1930, 28: 474-491.
- [3] 中野秀章. 森林水文学. 李云森, 译. 北京: 中国林业出版社, 1983: 75-76.
- [4] 吴钦孝, 陈云民, 刘向东, 赵鸿雁. 森林保持水土机理及功能调控技术. 北京: 科学出版社, 2005: 6, 50, 58.
- [5] Findeling A, Ruy S, Scopel E. Modeling the effects of a partial residue mulch on runoff using a physically based approach. Journal of Hydrology, 2003, 275(1/2): 49-66.
- [6] Li X, Niu J Z, Xie B Y. Study on hydrological functions of litter layers in North China. Plos One, 2013, 8(7): 1-11.
- [7] 张光辉, 梁一民. 植被盖度对水土保持功效影响的研究综述. 水土保持研究, 1996, 3(2): 104-110.
- [8] 郭忠升. 水土保持植被的有效盖度、临界盖度和潜势盖度. 水土保持通报, 2000, 20(2): 60-62.
- [9] Wischmeier W H, Smith D D. Predicting rainfall erosion losses-a guide to conservation planning. USDA Agricultural Handbook. No. 537. Washington. D.C.; SUDA, 1978.
- [10] Wiersum K F. Effect of various vegetation layers in an Acacia auriculiformis forest plantation on surface erosion in Java, Indonesia. Soil erosion and conservation. The international conference. New York, 1983.
- [11] 吴长文, 王礼先. 水土保持林中枯落物的作用. 中国水土保持, 1993, (4): 28-30.
- [12] 唐克丽, 张科利, 郑粉莉, 查轩, 王文龙, 蔡庆, 白红英. 子午岭林区自然侵蚀和人为加速侵蚀剖析. 中国科学院水利部西北水土保持研究所集刊(土壤侵蚀与生态环境演变研究论文集), 1993, 17(1): 17-28.
- [13] 赵艳云, 程积民, 万惠娥, 胡相明. 六盘山不同森林群落地被物的持水特性. 林业科学, 2009, 45(4): 145-150.
- [14] 莫菲, 于澎涛, 王彦辉, 王晶, 熊伟, 徐丽宏. 六盘山华北落叶松林和红桦林枯落物持水特征及其截持降雨过程. 生态学报, 2009, 29(6): 2868-2876.
- [15] 刘宇, 郭建斌, 王彦辉, 刘泽彬, 邓秀秀, 张桐, 熊伟, 左海军. 宁夏六盘山不同密度华北落叶松人工林枯落物水文效应. 北京林业大学学报

- 报,2016,38(8):36-44.
- [16] 高迪,郭建斌,王彦辉,王晓,马菁,洪流,高艳斌. 宁夏六盘山不同林龄华北落叶松人工林枯落物水文效应. 林业科学研究,2019,32(4):26-32.
- [17] 赵鸿雁,吴钦孝,刘国彬. 黄土高原人工油松林枯枝落叶层的水土保持功能研究. 林业科学,2003,39(1):168-172.
- [18] 余新晓,史宇,王贺年. 森林生态系统水文过程与功能. 北京:科学出版社,2013:65-70.
- [19] 马晓至,毕华兴,王珊珊,崔艳红,赵丹阳,云慧雅,侯贵荣. 晋西黄土区典型林分枯落物层水文生态特性研究. 水土保持学报,2020,34(6):77-83,88.
- [20] 陈云明,陈永勤. 人工沙棘林水文水土保持作用机理研究. 西北植物学报,2003,23(8):1357-1361.
- [21] 栾莉莉,张光辉,孙龙,刘法,王浩. 黄土高原区典型植被枯落物蓄积量空间变化特征. 中国水土保持科学,2015,13(6):48-53.
- [22] 王忠禹,刘国彬,王兵,汪建芳,肖婧,李兆松. 黄土丘陵区典型植物枯落物凋落动态及其持水性. 生态学报,2019,39(7):2416-2425.
- [23] 杨寒月,张光辉,张宝军. 黄土丘陵区沟坡典型植物群落枯落物蓄积量及其持水性能. 中国水土保持科学,2019,17(3):83-90.
- [24] 张宝琦,王忠禹,杨艳芬,张娜娜,李永宁. 黄土丘陵沟壑区典型灌木林地枯落物的蓄积特征及持水性能. 水土保持通报,2019,39(4):76-81.
- [25] 程积民,李香兰. 子午岭植被类型特征与枯枝落叶层保水作用的研究. 武汉植物学研究,1992,10(1):55-64.
- [26] 胡秀娟,程积民,万惠娥. 子午岭林区辽东栎、油松、柴松群落特征及其枯枝落叶层水文效应研究. 水土保持通报,2010,30(4):46-50.
- [27] 景贵阳. 陇东黄土高原人工刺槐林枯落物层和土壤层生态水文功能研究[D]. 兰州:甘肃农业大学,2017.
- [28] 侯贵荣,毕华兴,魏曦,周巧稚,孔凌霄,王杰帅,贾剑波. 黄土残塬沟壑区3种林地枯落物和土壤水源涵养功能. 水土保持学报,2018,32(2):357-363.
- [29] 刘国彬,上官周平,姚文艺,杨勤科,赵敏娟,党小虎,郭明航,王国梁,王兵. 黄土高原生态工程的生态成效. 中国科学院院刊,2017,32(1):11-19.
- [30] 陈妮. 基于侵蚀机理的北洛河流域植被覆盖格局时空演变研究[D]. 杨凌:西北农林科技大学,2013.
- [31] 闫瑞. 黄土高原北洛河上游流域退耕还林草的水文响应模拟[D]. 杨凌:西北农林科技大学,2017.
- [32] 邹厚远,刘国彬,王晗生. 子午岭林区北部近50年植被的变化发展. 西北植物学报,2002,22(1):1-8.
- [33] 杜捷. 北京山区森林枯落物层水文过程模拟研究[D]. 杨凌:西北农林科技大学,2017.
- [34] Richard Lee. Forest hydrology. Translated by Zhang Jianlie. Harbin: Northeast Forestry University Press, 1984.
- [35] 陈奇伯,解明曙,张洪江. 森林枯落物影响地表径流和土壤侵蚀研究动态. 北京林业大学学报,1994,16(S3):106-110.
- [36] Wang Y P, Law R M, Pak B. A global model of carbon, nitrogen and phosphorus cycles for the terrestrial biosphere. Biogeosciences, 2010, 7(7):2261-2282.
- [37] 汪建芳,王兵,王忠禹,李兆松,肖婧. 黄土高原典型植被枯落物坡面分布及持水特征. 水土保持学报,2018,32(4):139-144.
- [38] 马雪华. 森林水文学. 北京:中国林业出版社,1993:89.
- [39] 张洪江,程金花,余新晓,张东升,赵玉涛. 贡嘎山冷杉纯林枯落物储量及其持水特性. 林业科学,2003,39(5):147-151.
- [40] 赵鸣飞,薛峰,吕烨,左婉怡,王国义,邢开雄,王宇航,康慕谊. 黄土高原森林枯落物储量、厚度分布规律及其影响因素. 生态学报,2016,36(22):7364-7373.
- [41] 万春红,陶楚,杨小波,龙文兴,冯丹丹,周文嵩,杨琦. 森林群落物种组成对凋落物组成的影响. 生态学报,2015,35(22):7435-7443.
- [42] 舒韦维,卢立华,李华,农友,何日明,陈海,黄彪. 林分密度对杉木人工林林下植被和土壤性质的影响. 生态学报,2021,41(11):4521-4530.