

东部山地不同林型枯落物及土壤水文效应

李琳^{1,2}, 王帅¹, 戚福坤¹, 刘玉龙^{1,2,3}, 张鹤东^{1,3}, 张东来^{1,2,3*}

(1. 黑龙江省生态研究所, 哈尔滨 150081; 2. 黑龙江省森林生态与林业生态工程重点实验室, 哈尔滨 150081; 3. 黑龙江牡丹江森林生态系统国家定位观测研究站, 黑龙江牡丹江 157500)

摘要: 水源涵养林构建及质量提升是森林经营管理的重要研究内容之一。通过研究枯落物和土壤水文效应, 比较黑龙江省东部山地阔叶红松林 (KH)、云冷杉林 (YLS)、落叶松林 (LYS) 和蒙古栎林 (MGL) 4种林型水源涵养功能差异。结果表明, 4种林型枯落物总厚度为 3.08~7.78 cm, 蓄积量为 7.65~11.08 t/hm²。枯落物未分解层有效拦蓄量为 2.58~15.41 t/hm²、有效拦蓄率为 56.02%~216.67%; 半分解层有效拦蓄量为 0.95~9.88 t/hm²、有效拦蓄率为 62.78%~281.29%, 未分解层的水源涵养功能更高。枯落物浸水时间与枯落物持水量表现为对数关系, 与吸水速率则为幂函数关系。4种林型土壤孔隙度随土层增加而减小, 与土壤容重成反比。阔叶红松林、云冷杉林、落叶松林、蒙古栎林林型 0~20 cm 土层土壤饱和持水量为 973.41~1 085.08 t/hm²。4种林型总持水量由大到小为 KH、LYS、MGL、YLS, 其中土壤层在森林水源涵养功能发挥中起关键作用, 其持水量占总持水量的 97.41%~98.15%。研究结果为该地区水源涵养林提质改造提供理论依据。

关键词: 东部山地; 不同林分类型; 枯落物持水性; 土壤持水性; 森林水源涵养功能

中图分类号: S715.3

文献标识码: A

DOI: 10.7525/j.issn.1006-8023.2025.06.014

Hydrological Effects of Litter and Soil in Different Forest Types in Eastern Mountainous Areas

LI Lin^{1,2}, WANG Shuai¹, QI Fukun¹, LIU Yulong^{1,2,3}, ZHANG Hedong^{1,3}, ZHANG Donglai^{1,2,3*}

(1. Heilongjiang Ecology Institute, Harbin 150081, China; 2. Key Laboratory of Forest Ecology and Forestry Ecological Engineering, Harbin 150081, China; 3. Heilongjiang Mudanjiang Forest Ecosystem National Positioning Observation and Research Station, Mudanjiang 157500, China)

Abstract: The construction and quality improvement of water conservation forests are important research contents in forest management. This paper compares the differences in water conservation functions among four forest types in the eastern mountainous areas of Heilongjiang Province through the study of litter and soil hydrological effects: Korean pine-broadleaved forest (KH), spruce-fir forest (YLS), larch forest (LYS), and Mongolian oak forest (MGL). The results indicate that the total thickness of the litter layer for the four forest types in the mountainous areas of eastern Heilongjiang Province varies from 3.08 to 7.78 cm, and the litter stock volume ranges from 7.65 to 11.08 t/hm². The effective water retention capacity of the undecomposed litter layer is 2.58–15.41 t/hm², with an effective retention rate of 56.02%–216.67%. The effective water retention capacity of the semi-decomposed layer is 0.95–9.88 t/hm², and the effective retention rate reaches 62.78%–281.29%. The water conservation capacity of the undecomposed layer is higher. The immersion time of the litter has a logarithmic relationship with the litter's water holding capacity and a power function relationship with the water absorption rate. For the four forest types, the soil bulk density increases with the increase of soil depth, while the soil porosity decreases. The soil saturated water holding capacity in the 0–20 cm soil layer of KH, YLS, LYS, and MGL ranges from 973.41 to 1,085.08 t/hm². The total water holding capacity of the four forest types, from largest to smallest is KH, LYS, MGL, and YLS. The soil layer plays a key role in the water conservation function of forests, with

收稿日期: 2025-05-06

基金项目: 黑龙江省省属科研院所科研业务费项目 (CZKYF2024-1-B021)。

第一作者简介: 李琳, 硕士, 副研究员。研究方向为土壤生态学。E-mail: lilin_1002@163.com

* 通信作者: 张东来, 硕士, 研究员。研究方向为植物生态学、森林培育学。E-mail: slkyzdl@163.com

引文格式: 李琳, 王帅, 戚福坤, 等. 东部山地不同林型枯落物及土壤水文效应[J]. 森林工程, 2025, 41(6): 1242-1250.

LI L, WANG S, QI F K, et al. Hydrological effects of litter and soil in different forest types in eastern mountainous areas[J]. Forest Engineering, 2025, 41(6): 1242-1250.

a water holding capacity of 97.41%–98.15% of the total water holding capacity. The research results provide a theoretical basis for the quality improvement and transformation of water conservation forests in this region.

Keywords: Eastern mountainous region; different forest types; water holding capacity of litter; water holding capacity of soil; water conservation of forest

0 引言

水源涵养功能是森林对降水重新分配及调蓄能力的体现。森林通过乔灌木等地上植被构成的林冠层,林下枝桠、落叶和种子等凋落物构成的枯落物层,以及对降水进行重新分配与调节的林下土壤层,其中枯落物层与土壤层,在拦蓄降水、减少地表径流形成及阻挡土壤冲蚀等方面发挥显著作用。由于不同林分类型植被结构存在差异,致使森林水文功能呈现出多样化的特点^[1]。因此,研究人员针对不同区域森林水文功能及水源涵养能力展开了深入的探究,结果表明林分类型^[2-4]、林分密度^[5-7]和经营方式^[8-10]等对森林水源涵养功能存在影响,但其变化规律、驱动因子及其内在影响机理尚未完全明晰。这使得研究人员在对森林生态系统水文功能开展定量研究时面临诸多阻碍^[11]。

黑龙江省东部山地是松花江水系的源头及重要水源涵养功能区^[12],天然林与人工林交错分布,原始地带性顶级森林植被类型为阔叶红松林,其他森林类型涵盖了受损恢复后的天然次生林及人工营造林等。目前,水源涵养林更新迟滞、林分结构不合理、群落多样性及稳定性较差^[13],森林在水源涵养方面的功能难以充分施展,其效用也无法得到有效体现。目前有关东

部山地水源涵养能力的研究正在进行中,主要集中在灌木林^[14]、次生林水源涵养^[15]和土壤优先流等^[16],在不同林分类型水源涵养功能差异方面的相关研究还不够充分,亟须进行完善。因此,深入探究黑龙江省东部山地不同林分类型森林水文过程,可为水源涵养林构建及质量提升提供理论依据,对于筑牢北方生态安全屏障具有不可忽视的意义。

1 研究区与方法

1.1 研究区域概况

研究区位于黑龙江牡丹江森林生态系统国家定位观测研究站,该观测研究站地处长白山支脉老爷岭东侧,平均海拔600 m。该区域为中高纬度北温带大陆性季风气候,年降水量为430~520 mm。研究区代表性林型主要为阔叶红松天然林、云冷杉天然林、蒙古栎天然林和落叶松人工林等。

1.2 样地设置

于2024年5月在定位观测研究站内,选取阔叶红松林(KH)、云冷杉林(YLS)、落叶松林(LYS)和蒙古栎林(MGL)4种典型林分类型设置研究样地,样地大小为20 m×20 m,每种林型设置3个重复样地,且间距大于100 m。样地概况见表1。

表1 样地概况

Tab. 1 General situation of the sample plot

样地 Plot	林型 Forest type	坐标 Coordinate	起源及林龄 Origin and age of stands	海拔/m Elevation	坡度/(°) Slope gradient	坡向 Slope aspect	平均胸径/cm Mean DBH	郁闭度 Canopy density
KH	阔叶红松林	130.056 242°E, 44.182 212°N	天然成熟林	731.33 ± 9.29	5~15	西南	9.74 ± 1.69	0.80 ± 0.00
		130.055 895°E, 44.182 462°N						
		130.056 748°E, 44.182 588°N						
YLS	云冷杉林	130.113 198°E, 43.945 880°N	天然成熟林	598.33 ± 8.96	5~15	东北	14.81 ± 1.79	0.77 ± 0.06
		130.115 203°E, 43.947 527°N						
		130.115 483°E, 43.947 548°N						
LYS	落叶松林	130.195 412°E, 44.202 115°N	人工近成熟林	525.63 ± 14.20	< 5	东北	9.80 ± 1.63	0.73 ± 0.06
		130.195 390°E, 44.201 695°N						
		130.194 743°E, 44.201 383°N						
MGL	蒙古栎林	130.170 532°E, 44.077 042°N	天然成熟林	552.33 ± 6.81	5~15	东南	10.96 ± 0.68	0.73 ± 0.06
		130.170 593°E, 44.077 388°N						
		130.170 282°E, 44.076 602°N						

注:表中数据为平均值±标准差, n=3。

Note: The data in the table are mean ± standard deviation, n=3.

1.3 枯落物样品采集及测定

2024年10月对枯落物样品进行采集。在样地内,随机设置3个1 m×1 m的枯落物收集样方。分别测量

未分解层和半分解层枯落物厚度及总鲜质量。称量后,将部分枯落物样品回实验室,其余样品归还样地。带回实验室的枯落物样品分成2部分,一部分于65 °C

烘干至恒质量,用于测定蓄积量;一部分自然风干,用于后续研究。称取50 g左右(精确到0.01 g)风干枯落物样品装入孔径为0.1 mm的尼龙网袋没入水中进行浸泡,用于测定枯落物持水量,称量浸泡0.5、1、2、4、8、12、24 h后的质量,每次称量需取出悬挂至不再滴水。浸泡24 h后于室温(25℃)悬挂0.5、1、2、4、8、12、24 h,分别称量自然失水后的质量,并于24 h后全部于65℃烘干并记录烘干后的质量。计算方法参照王零等^[5],公式为

$$R_{\max} = (M_{24} - M_a) / M_a \times 100\% \quad (1)$$

$$W = M \times R_{\max} \quad (2)$$

$$W_{sv} = (0.85R_{\max} - R_0) \quad (3)$$

$$W_i = (M_i - M_b) / M_b \times 1000 \quad (4)$$

$$W_j = (M_{24} - M_j) / M_b \times 1000 \quad (5)$$

$$V_{ij} = W_{ij} / T_{ij} \quad (6)$$

式中: R_{\max} 为枯落物最大持水率; W 为枯落物最大持水量; W_{sv} 为枯落物有效拦蓄量; W_i 为枯落物浸水第*i*小时的持水量; W_j 为枯落物失水第*j*小时的失水量; M_{24} 为枯落物浸水24 h的质量; M_a 为枯落物烘干后的质量; M_b 为枯落物风干后的质量; M 为枯落物蓄积量; R_0 为枯落物自然含水率; M_i 为枯落物浸水第*i*小时($i=0.5, 1, 2, 4, 8, 12, 24$)的质量; M_j 为枯落物失水第*j*小时($j=0.5, 1, 2, 4, 8, 12, 24$)的重量; V_{ij} 为枯落物浸水或失水的速率; W_{ij} 为枯落物浸水或失水量; T_{ij} 为枯落物浸水或失水的时间。

1.4 土壤样品采集及测定

2024年8月采集土壤样品。每个样地沿对角线挖掘3个土壤剖面,用环刀采集深度为0~10、10~20、20~30、30~50 cm的土壤样品,每层采集3个样品。土壤样品的采集及含水率、容重和孔隙度等指标计算按照

LY/T 1215—1999《森林土壤水分—物理性质的测定》要求进行,公式为

$$W_l = 10000 \times P_l \times H \quad (7)$$

$$W_a = 10000 \times P_a \times H \quad (8)$$

$$W_b = 10000 \times P_b \times H \quad (9)$$

式中: W_l 为土壤饱和持水量; W_a 为土壤毛管持水量; W_b 为土壤非毛管持水量; P_l 为土壤总孔隙度; P_a 为土壤毛管孔隙度; P_b 为土壤非毛管孔隙度; H 为土层厚度。

1.5 数据处理与分析

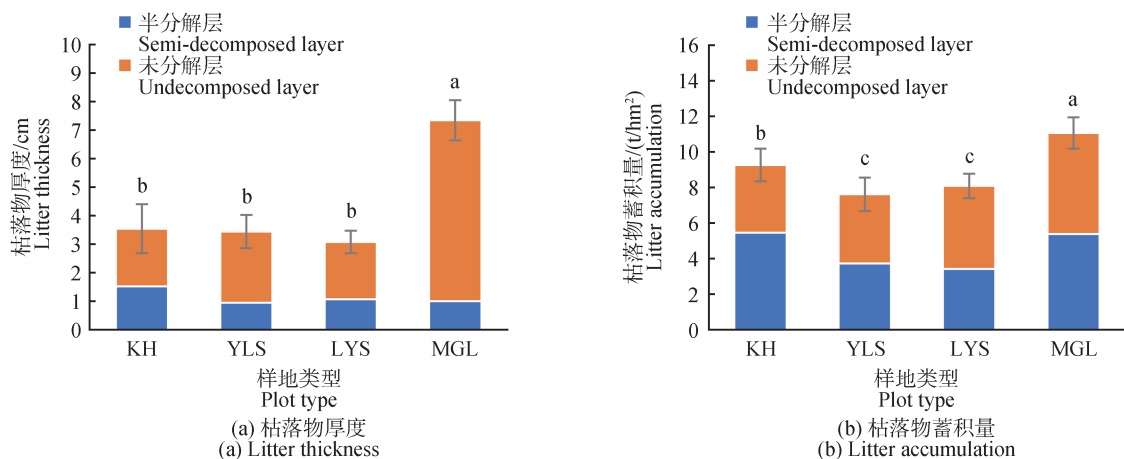
采用Excel和SPSS对数据进行统计作图,采用单因素方差分析(ANOVA)进行差异显著性检验($P < 0.05$),采用Duncan检验进行多重比较。

2 结果与分析

2.1 东部山地不同林型枯落物水文效应

2.1.1 枯落物特征

由图1结果可知,不同林型枯落物总厚度为3.08~7.78 cm,未分解层枯落物厚度大于半分解层,未分解层枯落物厚度由大到小为MGL、YLS、KH、LYS,半分解层枯落物厚度由大到小为KH、LYS、MGL、YLS。其中MGL受叶片形态影响,其未分解层枯落物厚度显著高于其他3种林型($P < 0.05$)。不同林型枯落物蓄积量为7.65~11.08 t/hm²,枯落物蓄积量表现出与枯落物厚度相同的变化趋势。未分解层及半分解层枯落物总厚度由大到小为MGL、KH、LYS、YLS,其中MGL及KH林型枯落物总蓄积量显著高于YLS和LYS林型($P < 0.05$),除KH外,MGL、YLS、LYS 3种林型未分解层枯落物蓄积量大于半分解层,这可能是KH林生物多样性较高,导致其枯落物降解速率大于其他3种林型。



不同小写字母表示不同林型间枯落物总厚度及枯落物总蓄积量差异显著($P < 0.05$)。

Different lowercase letters indicate significant differences ($P < 0.05$) in the total thickness and accumulation of litter between different forest types.

图1 不同林型枯落物特征

Fig. 1 Litter properties of different forest types

2. 1. 2 枯落物持水能力

枯落物持水能力结果见表 2。4 种林型未分解层最大持水率为 194. 43%~306. 89%，最大持水量为 5. 89~15. 46 t/hm²；半分解层最大持水率为 224. 36%~385. 38%，最大持水量为 7. 7~17. 58 t/hm²，相较于未分解层，半分解层的最大持水量和最大持水率更高。而不同林型间，枯落物未分解层最大持水量由大到小为 MGL、KH、YLS、LYS，半分解层最大持水量由大到小为 MGL、KH、LYS、YLS；枯落物未分解层最大持水率由大到小为 KH、LYS、MGL、YLS，半分解层最大持水率由大到小为 YLS、MGL、LYS、KH。结果表明，相较于其他 3

种林型，不同层的 MGL 枯落物均具有较大的持水量，KH 未分解层枯落物具有较大持水率。

由表 2 可知，4 种林型的枯落物未分解层有效拦蓄量为 2. 58~15. 41 t/hm²（由大到小为 MGL、KH、LYS、YLS），半分解层有效拦蓄量为 0. 95~9. 88 t/hm²（由大到小为 MGL、KH、YLS、LYS），且差异显著。不同林型枯落物有效拦蓄率差异显著，未分解层为 56. 02%~216. 67%（由大到小为 MGL、KH、LYS、YLS），半分解层为 62. 78%~281. 29%（由大到小为 KH、MGL、YLS、LYS）。结果表明，MGL 及 KH 枯落物层相较 YLS 和 LYS 的枯落物层对降水的拦蓄能力更强。

表 2 不同林型枯落物持水能力
Tab. 2 Litter water holding capacity of different forest types

样地 Plot	枯落物分层 Litter layer	最大持水量/(t·hm ⁻²) Maximum water holding capacity	最大持水率/% Maximum water holding rate	有效拦蓄量/(t·hm ⁻²) Effective holding capacity	有效拦蓄率/% Effective holding rate
KH	未分解层	10.86 ± 1.63b	270.87 ± 26.81a	7.17 ± 0.86b	177.44 ± 21.74a
	半分解层	13.75 ± 2.67a	287.46 ± 27.04a	6.31 ± 2.15a	188.68 ± 15.76a
YLS	未分解层	8.15 ± 0.95c	239.77 ± 25.53b	3.82 ± 0.87c	72.63 ± 12.18c
	半分解层	10.23 ± 1.55b	318.88 ± 30.25a	4.35 ± 0.83b	76.37 ± 7.69c
LYS	未分解层	8.11 ± 1.39c	256.16 ± 25.09ab	5.10 ± 1.91c	137.97 ± 14.53b
	半分解层	12.22 ± 1.36ab	293.07 ± 32.54a	1.69 ± 0.42c	68.87 ± 2.83c
MGL	未分解层	13.56 ± 1.48a	253.97 ± 20.82ab	11.00 ± 1.91a	177.58 ± 20.89a
	半分解层	13.52 ± 2.44a	304.38 ± 56.82a	7.38 ± 0.92a	167.70 ± 66.73b

注：表中数据为平均值±标准差，n=9；不同小写字母表示不同林型间差异显著(P<0. 05)。

Note: The data in the table are mean ± standard deviation, n=9; different lowercase letters indicate significant difference between different forest types (P<0. 05).

2. 1. 3 枯落物持水动态

不同枯落物层持水动态如图 2 所示，东部山地不同林型枯落物持水量随浸泡时间延长而增加，在浸泡

最初 2 h 增量较大，随后增量减小。枯落物浸水各时间段，枯落物未分解层持水量由大到小为 MGL、KH、LYS、YLS，半分解层持水量由大到小为 KH、MGL、

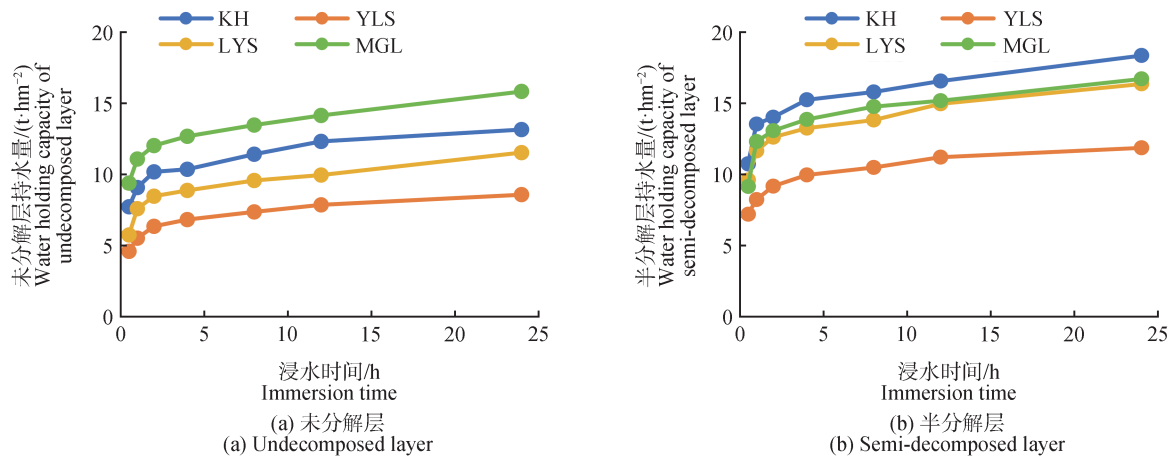


图 2 不同林型枯落物累积持水量与浸水时间的关系

Fig. 2 The relationship between the accumulated water holding capacity of litter in different forest types and the immersion time

LYS、YLS。4种不同林型的枯落物吸水速率曲线与持水量曲线趋势相反,初始浸泡速率最高,随着时间的延长吸水速率迅速降低,直至趋近于0。4种不同林型未分解层枯落物初始吸水速率由大到小为MGL、KH、

LYS、YLS,且差异显著($P<0.05$),这种差异随着吸水时间延长而减小,8 h趋于相同。而不同林型半分解层枯落物吸水速率差异不显著。

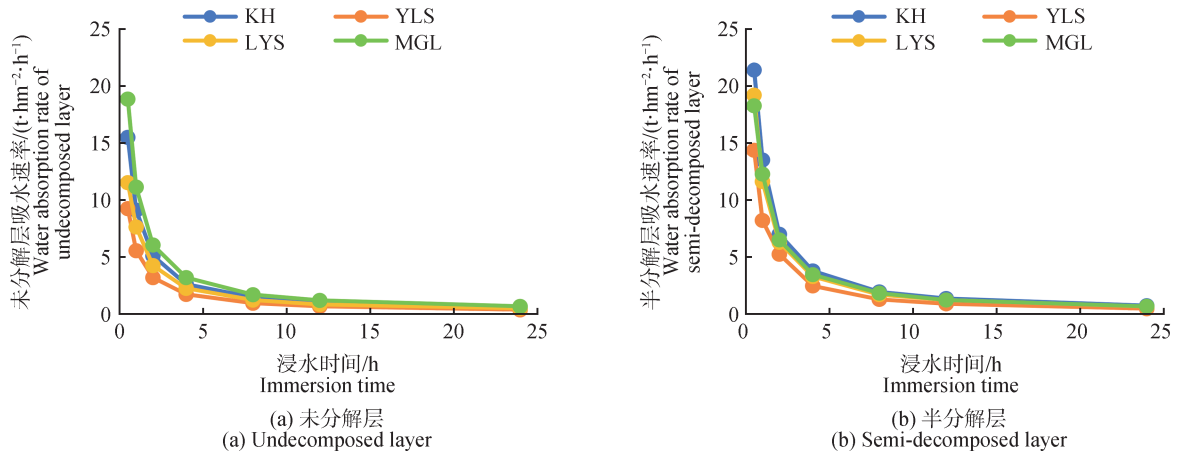


图3 不同林型枯落物吸水速率与浸水时间的关系

Fig. 3 The relationship between the water absorption rate of litter in different forest types and the immersion time

拟合分析结果见表3,东部山地不同林型枯落物持水量 $W(t/hm^2)$ 与浸水时间 $t(h)$ 存在对数关系,拟合方程

为 $W=a\ln(t)+b$; 枯落物吸水速率 $V(t/(hm^2 \cdot h))$ 与浸水时间 $t(h)$ 呈幂函数关系,拟合方程为 $V=ct^d$ 。

表3 不同林型枯落物持水量、吸水速率与浸水时间的拟合方程

Tab. 3 The fitting equation between the water holding capacity, water absorption rate and immersion time of litter in different forest types

样地 Plot	枯落物分层 Litter layer	持水量与浸水时间的拟合方程 The fitting equation between water holding capacity and immersion time	吸水速率与浸水时间的拟合方程 The fitting equation between water absorption rate and immersion time
KH	未分解层	$W=1.3314\ln(t)+8.8848, R^2=0.9792$	$V=8.8516t^{-0.871}, R^2=0.9930$
	半分解层	$W=1.7105\ln(t)+12.64, R^2=0.9498$	$V=12.569t^{-0.881}, R^2=0.9985$
YLS	未分解层	$W=0.9802\ln(t)+5.4659, R^2=0.9910$	$V=5.4299t^{-0.848}, R^2=0.9991$
	半分解层	$W=1.1833\ln(t)+8.1635, R^2=0.9933$	$V=8.3704t^{-0.881}, R^2=0.9970$
LYS	未分解层	$W=1.2929\ln(t)+7.1514, R^2=0.9529$	$V=7.085t^{-0.846}, R^2=0.9972$
	半分解层	$W=15.572\ln(t)+11.13, R^2=0.9658$	$V=11.084t^{-0.878}, R^2=0.9990$
MGL	未分解层	$W=1.4872\ln(t)+10.735, R^2=0.9754$	$V=10.706t^{-0.88}, R^2=0.9994$
	半分解层	$W=1.6839\ln(t)+11.361, R^2=0.9312$	$V=11.24t^{-0.868}, R^2=0.9970$

2.2 东部山地不同林型土壤水文效应

2.2.1 土壤容重和孔隙度

由表4可知,不同林型土壤容重随土层深度增加而增大。KH平均土壤容重为 $1.18 g/cm^3$, 低于LYS ($1.29 g/cm^3$) 和YLS ($1.39 g/cm^3$)。除MGL外,其他3种林型土壤非毛管孔隙度和毛管总孔隙度随土层增加而减小。土壤总孔隙度在不同土层中大致由大到小

表现为KH、YLS、LYS。MGL林下0~10 cm为土壤层,10~20 cm土层土壤砂质质量分数较高,20~50 cm则完全为砂砾层。因此本研究中MGL林下只对0~10 cm和10~20 cm 2个土层进行取样分析。结果表明,MGL林下土壤非毛管孔隙度、毛管孔隙度及总孔隙度随土层增加而减小。

表 4 不同林型土壤容重及孔隙度
Tab. 4 Soil bulk density and porosity of different forest types

土层/cm Soil layer	容重/(g·cm ⁻³) Soil bulk density	非毛管孔隙度/% Noncapillary porosity	毛管孔隙度/% Capillary porosity	总孔隙度/% Total porosity	
KH	0-10	1.01 ± 0.07cA	5.19 ± 2.18aA	51.18 ± 3.07aA	56.37 ± 3.35aA
	10-20	1.10 ± 0.07bB	5.23 ± 1.51aB	46.91 ± 1.61bA	52.14 ± 2.05bA
	20-30	1.19 ± 0.11bC	1.44 ± 1.17bAB	45.02 ± 3.15bcA	46.46 ± 3.10cA
	30-50	1.42 ± 0.13aC	1.43 ± 1.30bBC	43.37 ± 3.67cA	44.80 ± 3.78cA
YLS	0-10	0.91 ± 0.08dB	6.02 ± 1.36aA	46.49 ± 2.18aB	52.51 ± 2.09aB
	10-20	1.35 ± 0.05cA	3.39 ± 1.18bC	41.44 ± 3.41bB	44.83 ± 2.90bB
	20-30	1.62 ± 0.08bA	2.13 ± 0.73cA	35.66 ± 3.83cB	37.79 ± 4.08cB
	30-50	1.69 ± 0.06aA	1.92 ± 0.86cA	32.86 ± 3.56cB	34.78 ± 3.35cB
LYS	0-10	0.91 ± 0.08cB	6.03 ± 0.66aA	51.56 ± 3.61aA	57.6 ± 3.64aA
	10-20	1.35 ± 0.09bA	1.18 ± 0.28bD	45.82 ± 4.20bA	47.00 ± 3.99bB
	20-30	1.35 ± 0.10bB	1.06 ± 0.38bcB	36.08 ± 2.94cB	37.14 ± 3.16cB
	30-50	1.54 ± 0.12aB	0.73 ± 0.28cC	33.41 ± 2.69cB	34.15 ± 2.82cB
MGL	0-10	0.92 ± 0.09B	5.80 ± 1.95A	44.56 ± 2.60B	50.37 ± 3.97B
	10-20	1.08 ± 0.06B	12.95 ± 2.35A	38.62 ± 2.31B	51.57 ± 3.39A
	20-30	—	—	—	—
	30-50	—	—	—	—

注:表中数据为平均值±标准差, $n=9$; 不同小写字母表示同一林型在不同土层间差异显著 ($P<0.05$); 不同大写字母表示不同林型间差异显著 ($P<0.05$)。

Note: The data in the table are mean ± standard deviation, $n=9$; different lowercase letters indicate significant difference between different soil layers of the same forest type ($P<0.05$); different capital letters indicate significant difference between different forest types ($P<0.05$).

2.2.2 土壤持水能力

由图 4 可知, 4 种林型 0~20 cm 土层毛管持水量与饱和持水量分别为 831.82~980.87 t/hm² 和 973.41~1 085.08 t/hm², 不同林型土壤饱和持水量由大到小为 KH、MGL、LYS、YLS; 20~50 cm 土层毛管持水量与饱和持水量分别为 1 013.71~1 317.55 t/hm² 和 1 073.52~1 360.67 t/hm², 不同林型土壤饱和持水量由大到小为 KH、YLS、LYS。

2.3 东部山地不同林型水源涵养功能

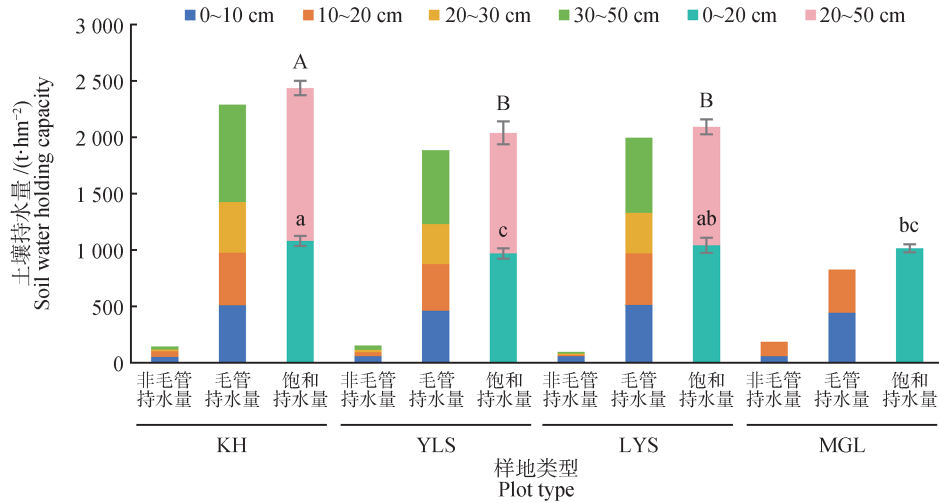
由于 MGL 土壤 20 cm 以下为砂砾, 因此对不同林型 0~20 cm 土壤及枯落物未分解层和半分解层总持水量进行统计, 以此作为不同林型森林水源涵养能力的指标, 结果如图 5 所示。4 种林型土壤层在森林水源涵养功能发挥中起关键作用, 土壤持水量占总持水量的 97.41%~98.15%。不同林型在水源涵养能力发挥中表现出差异, 由大到小为 KH、LYS、MGL、YLS, 其中 KH

土壤及枯落物持水量均较高。

3 讨论

3.1 枯落物水源涵养功能

目前, 国内外在对枯落物层的涵养水源功能进行研究时, 通常选取持水量和有效拦蓄量作为主要评定指标^[17-19]。枯落物持水量通常受枯落物种类、分解程度和自然持水量等因素影响。而有效拦蓄量反映枯落物实际的拦蓄能力, 除受枯落物种类、分解程度等因素影响外, 通常还受降雨情况、地形条件等因素交互影响。本研究中, 4 种林分类型未分解层和半分解层枯落物的最大持水率为 194.43%~385.38%, 最大持水量为 5.89~17.58 t/hm², 半分解层的最大持水量及最大持水率高于未分解层。此外, 研究表明影响 4 种林型枯落物最大持水情况及有效拦蓄情况的主要影响因子为枯落物蓄积量, 且二者极显著正相关 ($P<0.01$), 这一

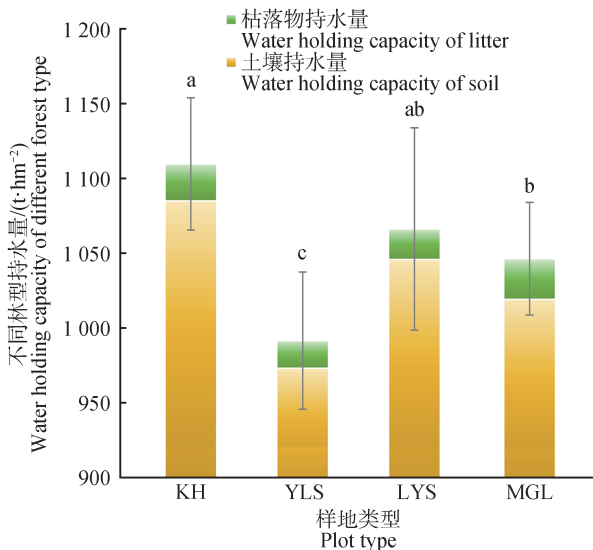


不同小写字母表示不同林型 0~20 cm 土层土壤持水量差异显著 ($P < 0.05$) ; 不同大写字母表示不同林型 20~50 cm 土层土壤持水量差异显著 ($P < 0.05$) 。

Different lowercase letters indicate significant differences in soil water holding capacity of 0~20 cm soil layer between different forest types ($P < 0.05$) ; different capital letters indicate significant differences in soil water holding capacity of 20~50 cm soil layer between different forest types ($P < 0.05$) 。

图4 不同林型土壤持水能力特征

Fig. 4 Water holding capacity of different forest types



不同小写字母表示不同林型间总持水量差异显著 ($P < 0.05$) 。

Different lowercase letters indicate significant differences in total water holding capacity between different forest types ($P < 0.05$) 。

图5 不同林型总持水量

Fig. 5 Total water holding capacity of different forest types

结论与卢德浩等^[3]研究结果相吻合。施宇等^[20]对东北地区主要树种未分解凋落叶水源涵养能力与叶性状的耦合关系研究结果表明,比叶面积是影响未分解凋落叶水源涵养能力的主要因素,未分解层最大持水率由大到小为落叶松、蒙古栎、红松、红皮云杉,这一结果能够解释本研究中未分解层最大持水率由大到小为LYS、MGL、KH、YLS。半分解层的持水能力较强,可能是由于其自身化学组成、含碳率等因素在发挥作用^[3]。

4种林型未分解层有效拦蓄量和有效拦蓄率均由大到小为MGL、KH、LYS、YLS,这可能是阔叶树种相比于针叶树种,其枯落物叶面积更大,叶片结构更复杂,能够阻挡吸收更多的水分进入土壤^[21]。4种林型枯水浸入时间与枯水持水量成对数函数关系,与吸水速率成幂函数关系,这一结论与过往相关研究成果^[17,22-23]相契合,进一步验证了枯落物水文特性变化的普遍规律。

3.2 土壤水源涵养功能

土壤的水源涵养功能一般以土壤持水能力作为直观体现,而这一能力主要与土壤孔隙结构密切相关。本研究中土壤持水量与土壤孔隙度的关系与以往研究结果相符^[24],均表现为正相关,并对土壤持水能力有益;而土壤非毛管孔隙度影响土壤透水通气的能力,能够加速进入土壤的水分迅速向下渗透,减小了降水对土壤的冲击。本研究中4种不同林型土壤容重随土层增加而增大,孔隙度随着土层增加而减小。本研究表明,0~20 cm 土层土壤饱和持水量由大到小为KH、MGL、LYS、YLS。这是因为阔叶红松林具有更为丰富的生物多样性,其枯落物更容易分解,增加了土壤有机质、改善了土壤孔隙结构^[25];同时,阔叶红松林丰富的根系结构及多样的根系分泌物,能够形成更稳定的土壤团粒结构,从而提高阔叶红松林土壤的水源涵养功能。

3.3 林型对森林生态系统水源涵养功能的影响

不同地域研究表明,不同林型对森林生态系统水源涵养功能存在影响。Tang等^[19]对我国西南地区3种典型马尾松林枯落物水文功能研究结果表明,马尾松

混交林枯落物持水及缓冲能力优于马尾松纯林。黄土高原2种代表林型水土保持功能评估结果表明,天然次生林在水源涵养及水土保持方面优于人工林^[26]。陈晶亮等^[17]研究结果表明宁夏罗山自然保护区混交林比纯林在水土保持和水源涵养方面更具优势。本研究结果与不同地域研究结果表现出相同规律,阔叶红松林(混交林)由于具有多样的乔木层和灌草层,地上丰富的枯落物种类及地下复杂的根系系统,在森林生态系统水源涵养功能发挥方面更具优势。因此,以水源涵养为目的营建的水土保持林,应选用当地优势树种,以近自然种植模式开展营建工作,避免种植人工纯林;对现有低质水源涵养林改造,应优先调整林分结构,增加植被多样性,从而提升其水源涵养功能。

4 结论

1) 黑龙江省东部山地4种林型枯落物总厚度为3.08~7.78 cm,蓄积量为7.65~11.08 t/hm²。枯落物未分解层有效拦蓄量2.58~15.41 t/hm²、有效拦蓄率56.02%~216.67%,半分解层有效拦蓄量为0.95~9.88 t/hm²,有效拦蓄率为62.78%~281.29%。拟合分析结果表明,东部山地不同林型枯落物持水量和吸水速率与枯落物浸水时间分别为对数函数关系和幂函数关系。

2) 4种林型土壤容重随土层增加而增大,总土壤孔隙度随土层增加而减小。0~20 cm土层土壤饱和持水量由大到小为KH、MGL、LYS、YLS。

3) 4种林型持水量由大到小为KH、LYS、MGL、YLS,土壤层在森林水源涵养功能发挥中起关键作用,其持水量平均占总持水量的97.86%。

参 考 文 献

- [1] 刘世荣,常建国,孙鹏森. 森林水文学:全球变化背景下的森林与水的关系[J]. 植物生态学报,2007(5):753-756.
LIU S R, CHANG J G, SUN P S. Forest hydrology: Forest and water in a context of global change [J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2007(5):753-756.
- [2] 王作泉,贺康宁. 祁连山东部地区不同林分水源涵养能力综合评估[J]. 生态学报,2024,44(17):7662-7672.
WANG Z X, HE K N. Comprehensive assessment of water conservation capacity in different forest stands in the eastern Qilian Mountains [J]. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(17):7662-7672.
- [3] 卢德浩,郑峰霖,古佳玮,等. 不同林分类型凋落物和土壤水源涵养能力分析评价[J]. 生态环境学报,2025,34(1):26-35.
LU D H, ZHENG F L, GU J W, et al. Analysis and evaluation of litter and soil water conservation capacity of different stand types [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2025, 34(1):26-35.
- [4] LIU Y X, SHI W J, TAO F L, et al. A global synthesis of multi-factors affecting water storage capacity in forest canopy, litter and soil layers [J]. Geophysical Research Letters, 2023, 50(3), e2022GL099888.
- [5] 王零,吕春燕,武天伟,等. 祁连山中段不同密度青海云杉林枯落物及土壤水源涵养功能研究[J/OL]. 中南林业科技大学学报,1-11 [2025-04-23].
WANG L, LYU C Y, WU T W, et al. Study on litter and soil water conservation function of *Picea crassifolia* forest with different stand densities in the middle part of Qilian mountains [J/OL]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 1-11 [2025-04-23].
- [6] 林立文,邓羽松,李佩琦,等. 桂北地区不同密度杉木林枯落物与土壤水文效应[J]. 水土保持学报,2020,34(5):200-207,215.
LIN L W, DENG Y S, LI P Q, et al. Study on the effects of litter and soil hydrology of different density *Cunninghamia lanceolata* forests in Northern Guangxi [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2020, 34(5):200-207, 215.
- [7] 赵阳. 不同密度油松人工林土壤特性及水源涵养功能研究[J]. 温带林业研究,2023,6(3):61-64.
ZHAO Y. Study on soil characteristics and water conservation function of *Pinus tabulaeformis* plantations with different densities [J]. Journal of Temperate Forestry Research, 2023, 6(3):61-64.
- [8] 马振环. 三种改造模式对杉木次生林水源涵养功能提升评价研究[D]. 广州:华南农业大学,2017.
MA Z H. Estimation of water conservation function in *Cunninghamia lanceolata* secondary forest under three grow patterns [D]. Guangzhou: College of Forestry and Landscape Architecture, 2017.
- [9] 李树宝,张丽娜,王树森,等. 森林经营方式对不同林龄落叶松林枯落物及土壤水源涵养能力的影响[J]. 森林工程,2023,39(2):12-21.
LI S B, ZHANG L N, WANG S S, et al. Effects of forest management methods on litter and soil water conservation capacity of *Larix principis-rupprechtii* plantation of different ages [J]. Forest Engineering, 2023, 39(2):12-21.
- [10] 廖春光,郭树平,刘忠玲. 黑龙江省东部山区杨桦次生林改造对林地水源涵养功能的影响[J]. 林业科技,2022,47(6):48-54.
LIAO C G, GUO S P, LIU Z L. Effects of reformation on the function of water conservation of polar-birch natural secondary forest stand in eastern mountain area of Heilongjiang Province [J]. Forestry Science & Technology, 2022, 47(6):48-54.

- [11] BROWN A E, ZHANG L, MCMAHON T A. A review of paired catchment studies for determining changes in water yield resulting from alterations in vegetation [J]. *Journal of Hydrology*, 2005, 310(1-4): 28-61.
- [12] 环境保护部和中国科学院. 全国生态功能区划(修编版) [R/OL]. (2015-11-13) [2025-4-23]. https://www.mee.gov.cn/gkml/hbb/bgg/201511/t20151126_317777.htm Ministry of Environmental Protection, Chinese Academy of Sciences. National ecological function zoning (revised edition) [R/OL]. (2015-11-13) [2025-4-23] https://www.mee.gov.cn/gkml/hbb/bgg/201511/t20151126_317777.htm
- [13] 范志平, 余新晓, 沈慧. 中国水源保护林生态系统功能评价与营建技术体系[J]. *世界林业研究*, 2000(1): 51-58. FAN Z P, YU X X, SHEN H. Ecosystem function evaluation of protection forest for headwater conservation and recharge improvement and construction technology system [J]. *World Forestry Research*, 2000(1): 51-58.
- [14] 孔亮. 黑龙江省东部山地灌木林水源涵养机理及功能评价[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2005. KONG L. Assessment and mechanism of the shrub water conservation function in east mountainous region of Heilongjiang Province [D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2005.
- [15] 孔祥飞, 赵雨森, 辛颖, 等. 黑龙江省东部山地天然次生林土壤水分的研究[J]. *森林工程*, 2009, 25(4): 6-9. KONG X F, ZHAO Y S, XIN Y, et al. Study on soil moisture of natural secondary forests in eastern mountainous region of Heilongjiang Province [J]. *Forest Engineering*, 2009, 25(4): 6-9.
- [16] 艾力夏提·库尔班. 黑龙江省东部山地针叶人工林土壤优先流及影响因素研究[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2022. AILIXIATI·KURBAN. Study on soil preferential flow and its influencing factors of coniferous plantation at eastern mountain in Heilongjiang Province [D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2022.
- [17] 陈晶亮, 杨慧, 刘超, 等. 宁夏罗山自然保护区3种典型林分凋落物和土壤层水源涵养能力综合评估[J]. *生态学报*, 2023, 43(19): 7987-7997. CHEN J L, YANG H, LIU C, et al. Comprehensive evaluation of the water conservation capacity of litter and soil layers in three typical forest types in the Luoshan Nature Reserve, Ningxia [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2023, 43(19): 7987-7997.
- [18] LIU X R, FENG T J, ZHANG Y F, et al. Vegetation restoration affects soil hydrological processes in typical natural and planted forests on the Loess Plateau [J]. *Journal of Hydrology*, 2025, 650: 132465.
- [19] TANG X Y, XU M, WANG X D, et al. Tree species composition affects litter eco-hydrological function in *Pinus massoniana* conifer-broadleaf mixed forest stands in Southwest China [J]. *Hydrological Processes*, 2024, 38(3): 15104.
- [20] 施宇, 唐慧敏, 宋晓倩, 等. 东北地区主要树种未分解凋落叶水源涵养能力与叶性状的耦合关系[J]. *水土保持通报*, 2024, 44(6): 46-56. SHI Y, TANG H M, SONG X Q, et al. Coupling relationship between water conservation capacity and leaf traits of undecomposed leaf litter of major tree species in Northeast China [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2024, 44(6): 46-56.
- [21] 马佳明, 赵鹏, 刘雪莹, 等. 崇陵流域不同林分类型枯落物水文效应研究[J]. *生态环境学报*, 2021, 30(4): 691-699. MA J M, ZHAO P, LIU X Y, et al. Research on the hydrological effects of litters of different forest types in Chongling Watershed [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2021, 30(4): 691-699.
- [22] 周长亮, 李惠丽. 接坝地区3种典型林分类型枯落物层和土壤层水文效应综合分析[J]. *林业与生态科学*, 2022, 37(3): 238-245. ZHOU C L, LI H L. Comprehensive analysis of hydrological effects of litter layer and soil layer of three typical forest types in Dam area [J]. *Forestry and Ecological Sciences*, 2022, 37(3): 238-245.
- [23] CHEN S J, CAO T J, TANAKA N, et al. Hydrological properties of litter layers in mixed forests in Mt. Qinling, China [J]. *iForest - Biogeosciences and Forestry*, 2018, 11(2): 243-250.
- [24] 王玮璐, 贺康宁, 张潭, 等. 青海高寒区水源涵养林土壤机械组成和理化性质对其饱和导水率和持水能力的影响[J]. *植物资源与环境学报*, 2020, 29(2): 69-77. WANG W L, HE K N, ZHANG T, et al. Effects of mechanical components and physical and chemical properties of soil in water conservation forests in cold highland area of Qinghai on its saturated hydraulic conductivity and water holding capacity [J]. *Journal of Plant Resources and Environment*, 2020, 29(2): 69-77.
- [25] HORODECKI P, NOWIŃSKI M, JAGODZIŃSKI A M. Advantages of mixed tree stands in restoration of upper soil layers on postmining sites: A five-year leaf litter decomposition experiment [J]. *Land Degradation & Development*, 2018, 30(1): 3-13.
- [26] WANG N, BI H X, PENG R D, et al. Disparities in soil and water conservation functions among different forest types and implications for afforestation on the Loess Plateau [J]. *Ecological Indicators*, 2023, 155: 110935.