

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2023.04.054.

张益, 林毅雁, 张杰铭, 等. 北京山区典型植被枯落物和土壤层水文功能[J]. 水土保持研究, 2023, 30(4): 160-168.

ZHANG Yi, LIN Yiyen, ZHANG Jieming, et al. Hydrological Function of Litter and Soil Layer of Typical Vegetation in Beijing Mountainous Area[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023, 30(4): 160-168.

北京山区典型植被枯落物和土壤层水文功能

张益^{1,2,3}, 林毅雁⁴, 张杰铭⁵, 贾国栋^{1,2,3}, 樊登星^{1,2,3}, 余新晓^{1,2,3}

(1.北京林业大学 水土保持学院, 北京 100083; 2.北京林业大学

国家林业与草原局水土保持重点实验室, 北京 100083; 3.北京林业大学 水土保持学院

首都圈森林生态系统教育部野外科学观测研究站, 北京 100083; 4.福建农业职业技术学院 园艺园林学院,

福州 350119; 5.南京水利科学研究院 水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 南京 210029)

摘要: [目的] 研究枯落物和土壤层水文功能, 从而明晰北京山区不同植被的水源涵养能力, 可为当地植被建设提供借鉴。[方法] 使用室内浸泡法、环刀法、定水头法等对北京山区不同植被的枯落物与土壤层水文功能进行了定量分析, 并通过相关性分析明确了有机碳与土壤层水文功能之间的关系。[结果] (1) 枯落物最大持水率、最大拦蓄率、有效拦蓄率为侧柏(*Platycladus orientalis*)×灌木混交林>五角枫(*Acer elegantulum*)纯林>五角枫×侧柏混交林>侧柏纯林。最大持水量、最大拦蓄量、有效拦蓄量均为五角枫纯林>侧柏×灌木混交林>五角枫×侧柏混交林>侧柏纯林, 且均为半分解层大于未分解层。(2) 土壤饱和持水量和毛管持水量排序为侧柏纯林>五角枫纯林>侧柏×灌木混交林>五角枫×侧柏混交林。土壤非毛管持水量大小排序为五角枫×侧柏混交林>五角枫纯林>侧柏×灌木混交林>侧柏纯林。土壤饱和导水率沿剖面向下逐渐减小, 平均饱和导水率最大的植被类型为侧柏×灌木混交林。(3) 土壤有机碳含量表现为沿剖面向下逐渐减小, 且土壤有机碳含量与容重、总孔隙度、非毛管孔隙度、饱和导水率均呈显著相关($p < 0.05$)。[结论] 纯林土壤层的持水能力整体优于混交林, 且都远超枯落物的持水能力。而混交林土壤导水能力整体优于纯林。有机碳可以显著影响土壤物理性质与导水能力, 对于改良土壤水文功能具有积极意义。

关键词: 水土保持; 水文功能; 北京山区; 枯落物; 土壤层

中图分类号: S718.5

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2023)04-0160-09

Hydrological Function of Litter and Soil Layer of Typical Vegetation in Beijing Mountainous Area

ZHANG Yi^{1,2,3}, LIN Yiyen⁴, ZHANG Jieming⁵, JIA Guodong^{1,2,3}, FAN Dengxing^{1,2,3}, YU Xinxiao^{1,2,3}

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

2.Key Laboratory of State Forestry and Grassland Administration on Soil and Water Conservation, Beijing

Forestry University, Beijing 100083, China; 3. Metropolitan Area Field Scientific Observation Research

Station, School of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China; 4.College of Horticulture and Forestry, Fujian Vocational College of Agriculture, Fuzhou 350119, China; 5.State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China)

Abstract: [Objective] The water conservation capacity of different vegetation in Beijing mountainous area can be clarified through studying the hydrological function of litter and soil layer, which can provide reference for local vegetation construction. [Methods] The hydrological functions of litters and soil layers of different vegetation types in the Mountains of Beijing were quantitatively analyzed by the methods of indoor immersion, circumferential knife cutting and water head fixing. The relationship between organic carbon and hydrological

收稿日期: 2022-05-24

修回日期: 2022-06-05

资助项目: 国家自然科学基金“季节性干旱的树木水分利用适应机制研究”(41877152)

第一作者: 张益(1998—), 男, 江西九江人, 硕士研究生, 主要从事土壤水文学、水土保持研究。E-mail: 1491329925@qq.com

通信作者: 余新晓(1961—), 男, 甘肃平凉人, 博士, 教授, 主要从事水土保持研究。E-mail: yuxinxiao111@126.com

<http://stbcyj.paperonce.org>

function of soil layer was clarified by correlation analysis. [Results] (1) The maximum water holding rate, maximum retention rate and effective retention rate of litter decreased in the order: the mixed forest of *Platycladus orientalis* × shrub > the pure forest of *Acer elegantulum* > the mixed forest of *Acer elegantulum* × *Platycladus orientalis* > the pure forest of *Platycladus orientalis*. The maximum water holding capacity, the maximum holding capacity and the effective holding capacity of litter decreased in the order: the pure forest of *Acer elegantulum* > the mixed forest of *Platycladus orientalis* × Shrub > the mixed forest of *Acer elegantulum* × *Platycladus orientalis* > the pure forest of *Platycladus orientalis*, and these parameters of semi-decomposed layers were greater than those of the undecomposed layers. (2) The order of soil saturated water holding capacity and capillary water holding capacity were the pure forest of *Platycladus orientalis* > the pure forest of *Acer elegantulum* > the mixed forest of *Platycladus orientalis* × Shrub > the mixed forest of *Acer elegantulum* × *Platycladus orientalis*. The order of non-capillary water holding capacity of different vegetation type were the mixed forest of *Acer elegantulum* × *Platycladus orientalis* > the pure forest of *Acer elegantulum* > the mixed forest of *Platycladus orientalis* × Shrub > the pure forest of *Platycladus orientalis*. The soil saturated hydraulic conductivity decreased gradually along the profile, and the maximum value of average saturated hydraulic conductivity was observed in the mixed forest of *Platycladus orientalis* × shrub. (3) Soil organic carbon content decreased gradually along the profile, and was significantly correlated with bulk density, total porosity, non-capillary porosity and saturated hydraulic conductivity ($p < 0.05$). [Conclusion] The water holding capacity of soil layer of pure forest was better than mixed forest on the whole, and exceeded that of litter. The soil water storage capacity of mixed forest was better than pure forest. Organic carbon can significantly affect soil physical properties and water conductivity, which is of positive significance for improving soil hydrological function.

Keywords: soil and water conservation; hydrological function; Beijing mountainous area; litter; soil layer

森林作为一种广泛存在的生态系统类型,具有水源涵养、气候调节、生物多样性等重要作用^[1]。其中水源涵养功能在水资源日益短缺、人水矛盾不断加剧的当下,越发受到学者们的重视。水源涵养通过森林水文功能来实现,具体来说,主要通过林冠层、枯落物层、土壤层3个层面来实现对于降雨的再分配,达到减少径流、涵养水源、保水固土的目的^[2]。枯落物通过对降雨的消能、拦蓄、吸持直接改变了地表径流,促进了水分入渗^[3]。同时枯落物分解后的有机碳可以改善土壤结构,促进水分入渗^[4]。土壤层通过对水分的吸持、传导使得水分保持在土壤中,减小了地表径流^[5]。因此,枯落物和土壤层是森林水文功能的主要部分,也是目前森林水文功能研究的重点^[6]。

目前对于枯落物和土壤层水文功能的研究有很多。主要集中在通过不同的土地利用类型、不同的植被类型、不同密度的林分、不同退化过程、不同植被恢复过程的枯落物和土壤层进行试验,分别计算枯落物和土壤层的持水性能^[7-11]。但这些研究都将土壤层水文功能归结为土壤持水能力,而实际上,土壤的水分调节能力也是土壤层水文功能的体现^[12]。土壤饱和和导水率作为土壤水分调节能力的重要指标,在森林

水文功能的研究中较少考虑。森林同时是重要的碳库,通过吸收二氧化碳固存碳^[13]。通过枯落物分解和根系分泌物等形式向土壤中输入有机碳,而有机碳可以改变土壤结构,进而改变了土壤层的水文功能。作为森林3个活动层中水分调节能力最强的土壤层,其水文功能受到土壤有机碳怎样的影响,以往的研究少有提及^[14]。通过研究有机碳与土壤层水文功能的关系,可以加深对于土壤层水文功能的理解,同时为改良土壤层水文功能提供一定的参考。

北京市年降雨总量不高,但近年来极端降雨事件频发,高强度、短历时的降雨在地面快速形成地表径流,侵蚀坡面,带来了很大的安全隐患。而森林的水文功能可以显著改变降雨的再分配过程,从而达到减小灾害、涵养水源的作用。以往的研究主要集中在黄土区和生态环境脆弱区,例如祁连山区、青藏高原区,对于华北土石山区的研究相对较少。而不同的研究区植被类型、气候条件都存在差异,所产生的水文效应也不同。因此,需要对华北土石山区的水文效应展开研究。综上,本文选择华北土石山区的代表区域即北京山区4种典型的植被类型,对枯落物蓄积量与持水能力、土壤物理性质与导水能力进行

测定,同时明确土壤水文功能与有机碳之间的关系。为今后改善森林水文功能、充分发挥森林生态、社会效益提供有力借鉴。

1 研究区概况

鹭峰国家森林公园地处北京市海淀区苏家坨镇。位于北纬 $39^{\circ}54'$,东经 $116^{\circ}28'$,面积为 832.04 km^2 。经过长期的造林与抚育管理,园内森林覆盖率已达 96.4% 。气候上属于暖温带半湿润季风大陆性气候区,四季分明。夏季炎热多雨、雨热同期,冬季寒冷干燥。年降雨量 630 mm ,年潜在蒸发量 $1\,800 \text{ mm}$ 。年平均气温 12.5°C ,历史最高气温 41.6°C ,最低气温 -21.7°C 。土壤多为淋溶褐土与棕壤土,土中石砾较多。植被在 20 世纪大规模人工造林后已经发生转变,如今主要树种为栓皮栎 (*Quercus variabilis*)、刺槐 (*Robinia pseud-acacia*)、五角枫 (*Acer elegantulum*)、侧柏 (*Platy-cladus orientalis*)、元宝枫 (*Acer truncatum*) 等。

2 研究方法

2.1 野外取样

在对北京山区植被进行调查研究后,选择五角枫纯林、侧柏纯林、侧柏×五角枫混交林、侧柏×灌木混交林等 4 种在北京山区分布广泛的植被类型。每种植被类型建立坡度、坡向、种植密度等基本一致的 3 个 $20 \text{ m} \times 20 \text{ m}$ 的样地。样地的基本情况见表 1。

在每个样地选择 3 个具有代表性的 $50 \text{ cm} \times 50 \text{ cm}$ 的样方,对样方内未分解层与半分解层的枯落物分别先称量鲜重,再进行收集。在各样地中分别选择 3 个样点挖掘深度为 60 cm 的剖面,在剖面上用环刀以 10 cm 为一层进行取样,用于土壤物理性质与饱和导水率的测定。取环刀样品时,保持环刀竖直打入土壤中,以免破坏土壤结构从而产生误差。同时在每一层多点取样并均匀混合装入自封袋带回实验室进行土壤有机碳含量测定。

表 1 样地基本情况调查表

植被 类型	平均 树高/m	平均 胸径/cm	坡向/ (°)	坡度/ (°)	密度/ (株· hm^{-2})
五角枫纯林	7.2	12.5	东北 61°	8.1	2136
侧柏纯林	8.8	15.9	东北 43°	9.5	2758
侧柏×五角枫混交林	4.8	9.5	东 90°	10.2	2091
侧柏×灌木混交林	4.5	17.1	东北 15°	9.8	2841

2.2 室内试验

2.2.1 枯落物样品测定 将收集的枯落物放入烘箱 85°C 烘至恒重,分别计算未分解层与半分解层的蓄

积量与自然含水率。采用室内浸泡法观察枯落物的持水过程,测定枯落物的持水能力。试验时将烘干的枯落物装入尼龙网中并扎紧尼龙网,将尼龙网放入水中,在 $0 \text{ h}, 0.25 \text{ h}, 0.5 \text{ h}, 1 \text{ h}, 2 \text{ h}, 4 \text{ h}, 8 \text{ h}, 12 \text{ h}, 24 \text{ h}$ 时将尼龙网取出悬置,等到无水珠落下时,将尼龙网置于天平上称重,记录持水过程。以试验结束时的结果计算枯落物的最大持水率和最大持水量。枯落物的最大拦蓄率、最大拦蓄量、有效拦蓄率、有效拦蓄量使用枯落物蓄积量、最大持水率、自然含水率进行计算^[15-16]。

2.2.2 土壤样品测定 采用环刀法、烘干法测定土壤物理性质(容重、总孔隙度、毛管孔隙度、非毛管孔隙度)与自然含水量。土壤最大持水量、土壤毛管持水量、土壤非毛管持水量的计算公式如下^[17]:

$$W_{\max} = 10000 P_{\max} H$$

$$W_m = 10000 P_m H$$

$$W_{fm} = 10000 P_{fm} H$$

式中: W_{\max} 为土壤最大持水量(t/hm^2); W_m 为土壤毛管持水量(t/hm^2); W_{fm} 为土壤非毛管持水量(t/hm^2); P_{\max} 为土壤总孔隙度; P_m 为土壤毛管孔隙度; P_{fm} 为土壤非毛管孔隙度; H 为土壤厚度(m),此处取 0.1 m 。饱和导水率通过环刀使用定水头法测定^[18],测量完成后将此温度下的饱和导水率统一转换为 10° 下的饱和导水率。使用重铬酸钾—稀释热法测定土壤有机碳含量^[19]。

2.3 试验方法

数据整理使用 Excel 2010,对于试验重复用 SPSS 22.0 进行单因素方差分析和差异显著性检验,作图使用 Origin 2021。

3 结果与分析

3.1 枯落物层水文功能分析

3.1.1 枯落物蓄积量 各植被枯落物蓄积量存在明显差异。由表 2 可以看出,枯落物总蓄积量的值为 $2.36 \sim 3.93 \text{ t}/\text{hm}^2$ 。按照大小排序为五角枫纯林 ($3.93 \text{ t}/\text{hm}^2$)>五角枫×侧柏混交林($3.44 \text{ t}/\text{hm}^2$)>侧柏×灌木混交林($3.04 \text{ t}/\text{hm}^2$)>侧柏纯林($2.36 \text{ t}/\text{hm}^2$)。半分解层的枯落物蓄积量大小为五角枫纯林($2.84 \text{ t}/\text{hm}^2$)>侧柏×灌木混交林($2.25 \text{ t}/\text{hm}^2$)>五角枫×侧柏混交林($1.99 \text{ t}/\text{hm}^2$)>侧柏纯林($1.41 \text{ t}/\text{hm}^2$)。未分解层蓄积量为五角枫×侧柏混交林($1.45 \text{ t}/\text{hm}^2$)>五角枫纯林($1.09 \text{ t}/\text{hm}^2$)>侧柏纯林($0.94 \text{ t}/\text{hm}^2$)>侧柏×灌木混交林($0.79 \text{ t}/\text{hm}^2$)。4 种植被类型都为半分解层蓄积量>未分解层蓄积量,半分解层蓄积量占总蓄积量的比例为 $57.8\% \sim 73.9\%$ 。

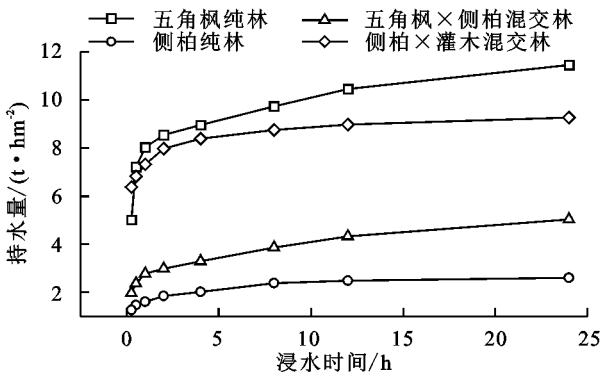
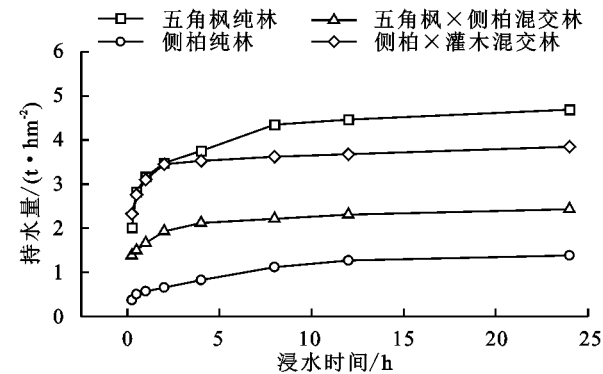
表 2 典型植被枯落物蓄积量统计表

植被类型	未分解层		半分解层		蓄积量/ (t·hm ⁻²)
	蓄积量/(t·hm ⁻²)	比例/%	蓄积量/(t·hm ⁻²)	比例/%	
五角枫纯林	1.09±0.16ab	27.7	2.84±0.30a	72.3	3.93
侧柏纯林	0.94±0.23b	40.1	1.41±0.20b	59.9	2.36
五角枫×侧柏混交林	1.45±0.37a	42.2	1.99±0.51b	57.8	3.44
侧柏×灌木混交林	0.79±0.16b	26.1	2.25±0.56ab	73.9	3.04

注:相同字母代表差异不显著,不同字母代表差异显著($p<0.05$)。

3.1.2 枯落物持水过程 枯落物半分解层、未分解层持水过程见图 1。由图 1 可知,不管是半分解层还是未分解层,枯落物的持水量在刚浸泡时迅速增加,而后增速放缓,在第 8 小时取出称重时,已经基本达到了最大持水量。从植被类型来看,半分解层和未分解层的持水过程中的持水量始终呈现出五角枫纯林>侧柏×灌木混交林>五角枫×侧柏混交林>侧柏纯林的规律。不管是试验开始时的持水量还是最大持水量,侧柏纯林的都要显著小于其他 3 种植被。将

枯落物持水过程中的持水量与时间进行回归分析,发现枯落物持水量与时间呈对数关系,见表 3。关系式为 $y=a\ln(t)+b$,其中 y 为持水量, a,b 为系数, t 为时间。由图 2 可知吸水速率从试验开始到结束是一个不断减小的过程,在前 30 min 较大,在 30 min 后保持匀速减小的过程。将吸水速率与时间进行回归分析,得出它们之间符合幂函数关系,关系式为 $v=m\cdot t^n$,见表 3。其中 V 为吸水速率 $[t/(hm^2\cdot h)]$, m 为系数, t 为时间(h), n 为指数。



注:左图为未分解层,右图为半分解层。下同。

图 1 枯落物持水量与浸水时间的关系

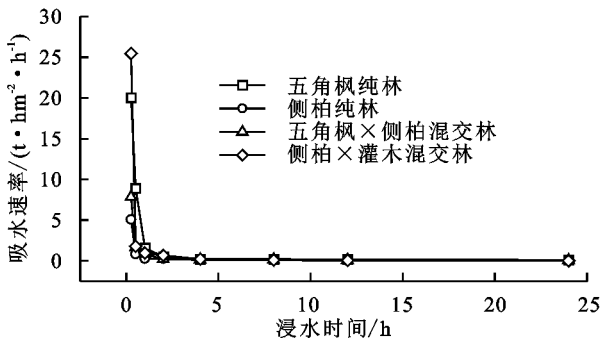
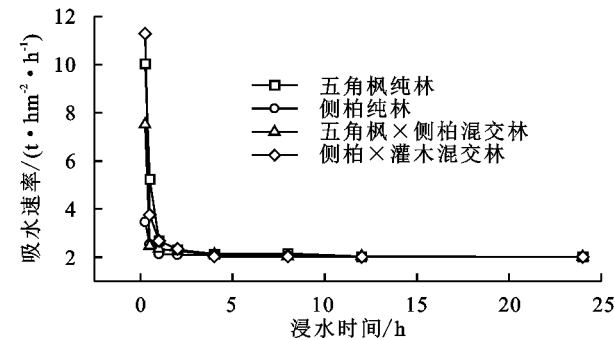


图 2 枯落物吸水速率与浸水时间的关系

3.1.3 枯落物持水与拦蓄能力 由表 4 可知,枯落物半分解层最大持水率 184.3%~412.3%,枯落物未分解层最大持水率 146.0%~485.9%,且均呈现侧柏×灌木混交林>五角枫纯林>五角枫×侧柏混交林>侧柏纯林的规律,侧柏纯林不同层次的最大持水率都是最小的。拦蓄率、拦蓄量体现了枯落物对降雨的实际拦蓄效果,在这里用有效拦蓄率和有效拦蓄

量来表示^[20]。由表 4 可知,枯落物半分解层和未分解层的有效拦蓄率分别介于 148.7%~341.0%和 109.7%~407.3%,从不同种类枯落物来看,有效拦蓄率侧柏×灌木混交林>五角枫纯林>五角枫×侧柏混交林>侧柏纯林。枯落物半、未分解层的有效拦蓄量均为五角枫纯林>侧柏×灌木混交林>五角枫×侧柏混交林>侧柏纯林。

表 3 枯落物持水量、吸水速率与时间的关系

植被类型	枯落物层	持水量与浸水时间		吸水速率与浸水时间	
		关系式	相关系数	关系式	相关系数
五角枫纯林	未分解层	$y=0.563\ln(t)+3.045$	0.974	$v=1.047t^{-1.302}$	0.962
	半分解层	$y=1.220\ln(t)+7.490$	0.949	$v=2.365t^{-1.202}$	0.927
侧柏纯林	未分解层	$y=0.231\ln(t)+0.610$	0.957	$v=0.265t^{-0.917}$	0.904
	半分解层	$y=0.309\ln(t)+1.657$	0.988	$v=0.516t^{-1.183}$	0.940
侧柏×五角枫混交林	未分解层	$y=0.242\ln(t)+1.705$	0.987	$v=0.457t^{-1.243}$	0.943
	半分解层	$y=0.633\ln(t)+2.709$	0.963	$v=0.945t^{-0.975}$	0.907
侧柏×灌木混交林	未分解层	$y=0.311\ln(t)+2.985$	0.915	$v=0.729t^{-1.503}$	0.956
	半分解层	$y=0.655\ln(t)+7.346$	0.988	$v=1.521t^{-1.365}$	0.951

表 4 典型植被枯落物持水能力与拦蓄能力

植被类型与 枯落物层		最大 持水率/%	最大持水量/ (t·hm ⁻²)	自然 含水率/%	最大 拦蓄率/%	最大拦蓄量/ (t·hm ⁻²)	有效 拦蓄率/%	有效拦蓄量/ (t·hm ⁻²)
五角枫纯林	未分解层	430.7±29.1b	4.71±0.94a	6.9±1.5b	423.8±28.0b	4.63±0.91a	359.2±23.6b	3.92±0.77a
	半分解层	402.4±21.2a	11.46±1.51a	7.4±0.9a	395.0±22.1a	11.25±1.51a	334.7±18.9a	9.53±1.28a
侧柏纯林	未分解层	146.0±22.7c	1.39±0.41b	14.4±2.1a	131.6±22.0c	1.25±0.39b	109.7±18.6c	1.04±0.33b
	半分解层	184.3±21.1c	2.60±0.44b	7.9±1.3a	176.4±22.4c	2.48±0.44b	148.7±19.3c	2.10±0.38b
五角枫×侧柏混交林	未分解层	166.8±15.7c	2.44±0.71b	11.8±2.5a	155.0±16.4c	2.28±0.70b	130.0±14.1c	1.91±0.60b
	半分解层	253.2±27.7b	5.13±1.93b	8.7±2.1a	244.5±29.8b	4.96±1.93b	206.5±25.6b	4.20±1.64b
侧柏×灌木混交林	未分解层	485.9±20.1a	3.85±0.83a	5.7±1.2b	480.2±21.1a	3.80±0.83a	407.3±18.1a	3.23±0.70a
	半分解层	412.3±23.3a	9.29±2.45a	9.5±1.7a	402.8±24.8a	9.08±2.43a	341.0±21.3a	7.69±2.06a

注：相同字母代表差异不显著，不同字母代表差异显著（ $p<0.05$ ）。

3.2 土壤层水文功能分析

3.2.1 土壤物理性质与持水能力 由表 5 可知，土壤容重为 1.29~1.64 g/cm³，从植被类型上来看，容重排序为侧柏纯林(1.43 g/cm³)<五角枫纯林(1.44 g/cm³)<五角枫×侧柏混交林(1.48 g/cm³)<侧柏×灌木混交林(1.50 g/cm³)。从土壤层次上来看，从土壤表层向深层容重呈现明显的增大趋势：0—10 cm(1.36 g/cm³)<10—20 cm(1.38 g/cm³)<20—30 cm(1.41 g/cm³)<30—40 cm(1.52 g/cm³)<40—50 cm(1.55 g/cm³)<50—60 cm(1.56 g/cm³)。土壤总孔隙度为 36.0%~56.4%，总孔隙度最大的植被类型为侧柏纯林，并与其他植被类型无显著差异（ $p>0.05$ ）。土壤毛管孔隙度介于 19.7%~39.1%，毛管孔隙度最大的植被类型为侧柏纯林，并与其他植被类型存在显著差异（ $p<0.05$ ）。土壤非毛管孔隙度介于 9.4%~25.1%，非毛管孔隙度最大的植被类型为五角枫×侧柏混交林，且显著大于侧柏×灌木混交林、侧柏纯林（ $p<0.05$ ）。整体来看，土壤孔隙度大小随土层变深基本呈现单一的减小趋势。

土壤最大持水量的最大值、最小值分别出现在五角枫纯林的 0—10 cm(563.96 t/hm²)和 50—60 cm(360.00 t/hm²)。从土壤层次上看，所选 4 种植被类型土壤最大持水量基本上都呈现沿着土层向下逐渐

变小的规律。从各植被类型土壤层总的土壤最大持水量来看，大小排序为侧柏纯林(2 850.32 t/hm²)>五角枫纯林(2 765.62 t/hm²)>侧柏×灌木混交林(2 651.43 t/hm²)>五角枫×侧柏混交林(2 565.66 t/hm²)。可以看出，纯林的土壤最大持水量整体大于混交林。土壤毛管持水量排序为侧柏纯林(2 106.70 t/hm²)>五角枫纯林(1 673.82 t/hm²)>侧柏×灌木混交林(1 660.53 t/hm²)>五角枫×侧柏混交林(1 386.73 t/hm²)。土壤非毛管持水量大小排序为五角枫×侧柏混交林(1 178.94 t/hm²)>五角枫纯林(1 091.80 t/hm²)>侧柏×灌木混交林(990.90 t/hm²)>侧柏纯林(743.62 t/hm²)。

3.2.2 土壤饱和导水率 各植被类型土壤饱和导水率见图 3。各植被类型的平均土壤饱和导水率依次为：五角枫纯林(0.73 mm/min)，侧柏纯林(0.91 mm/min)，五角枫×侧柏混交林(0.51 mm/min)，侧柏×灌木混交林(1.01 mm/min)，土壤饱和导水率在五角枫×侧柏混交林与侧柏纯林之间存在显著差异（ $p<0.05$ ）。

各土壤层的平均土壤饱和导水率从表层往下依次为 1.71,1.18,0.72,0.49,0.38,0.26 mm/min，整体趋势为表层土壤饱和导水率最大，并向下减小。在 0—10,10—20,20—30 cm 土层之间变异十分剧烈，几个土层之间均显示出显著差异（ $p<0.05$ ）。而在

30—40,40—50,50—60 cm 土层之间没有显示出显著差异($p>0.05$)。

3.2.3 有机碳含量及其与土壤层水文功能的关系

由图 4 可知,本试验所测得土壤有机碳含量介于 4.54~18.63 g/kg 之间,从植被类型来看,五角枫×侧柏混交林、侧柏×灌木混交林显著大于侧柏纯林($p<0.05$)。从土层来看 0—10 cm 有机碳含量最高,达到了 15.90 g/kg 且显著大于 20—30,30—40,40—50,

50—60 cm 土层($p<0.05$)。

将有机碳含量与代表土壤水文功能的几个参数进行 Pearson 相关分析。结果表明,有机碳含量与土壤水文的大部分参数都达到了显著相关关系。其中与土壤饱和导水率和非毛管孔隙度达到了极显著相关关系($p<0.01$),与总孔隙度和容重达到了显著相关($p<0.05$),与毛管孔隙度相关性较低,未达到显著水平($p>0.05$)。

表 5 典型植被土壤物理性质与持水能力

植被	土深/cm	容重/ ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	总孔隙度/%	毛管 孔隙度/%	非毛管 孔隙度/%	最大持水量/ ($\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$)	毛管持水量/ ($\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$)	非毛管持水量/ ($\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$)
五角枫纯林	0—10	1.29±0.10Ab	56.4±3.0Aa	31.3±1.3Ba	25.1±1.8Aa	563.96±39.69Aa	313.24±13.13Ba	250.72±18.11Aa
	10—20	1.31±0.10Bb	53.7±3.8Aab	29.5±2.9Bab	24.2±2.1Aa	536.97±37.70Aab	295.35±28.96Bab	241.62±21.38Aa
	20—30	1.38±0.12Aab	49.6±3.3Ab	28.3±1.8Bab	21.3±1.6Ab	495.64±32.70Ab	282.55±17.91Bab	213.10±15.54Ab
	30—40	1.55±0.16Aa	41.7±0.8Ac	26.7±2.0Bb	15.0±1.6Bc	417.63±7.96Ac	267.41±20.37Bb	150.22±16.11Bc
	40—50	1.54±0.13Aa	39.1±2.7Bcd	29.8±2.2ABab	9.4±1.0Cd	391.42±27.13Bcd	297.95±21.68ABab	93.47±10.37Cd
	50—60	1.58±0.07Aa	36.0±1.6Bd	21.7±1.3Cc	14.3±0.4Ac	360.00±16.41Bd	217.33±13.20Cc	142.67±3.76Ac
侧柏纯林	0—10	1.36±0.11Aa	53.7±2.9ABa	39.1±1.7Aa	14.6±1.4Ca	536.69±29.82ABa	391.05±17.02Aa	145.64±13.68Ca
	10—20	1.37±0.09ABa	52.5±3.1ABa	38.7±2.2Aa	13.8±1.1Ca	525.11±20.85ABa	387.30±21.61Aa	137.81±10.58Ca
	20—30	1.37±0.10Aa	50.2±1.7Aa	37.2±1.5Aa	13.0±0.3Ca	502.05±17.09Aa	372.34±14.59Aa	129.71±2.81Ca
	30—40	1.49±0.12Aa	44.1±3.5Ab	32.9±2.4Ab	11.2±1.2Cb	441.32±35.24Ab	329.33±23.97Ab	111.99±11.99Cb
	40—50	1.51±0.03Aa	43.9±2.3Ab	32.7±1.3Ab	11.3±1.3Cb	439.17±23.18Ab	326.65±12.78Ab	112.52±13.00Cb
	50—60	1.49±0.11Aa	40.6±1.8Ab	30.0±1.1Ab	10.6±0.9Bb	405.99±18.08Ab	300.04±11.16Ab	105.95±8.50Bb
五角枫×侧柏混交林	0—10	1.40±0.14Aa	50.6±3.1ABa	28.9±1.9BCa	21.7±1.3Ba	506.16±31.25ABa	289.20±18.46BCa	216.96±13.14Ba
	10—20	1.48±0.06Aa	44.9±3.3Bb	23.8±1.7Cb	21.1±1.8ABa	448.60±32.89Bb	237.87±17.09Cb	210.74±18.15ABa
	20—30	1.48±0.12Aa	42.1±3.1Bbc	20.7±1.3Cc	21.4±1.8Aa	420.87±31.08Bbc	206.55±13.41Cc	214.32±18.17Aa
	30—40	1.47±0.07Aa	43.5±3.3Ab	22.6±1.7CBc	20.9±1.5Aa	434.73±32.46Ab	226.01±17.35CBc	208.72±15.43Aa
	40—50	1.52±0.11Aa	37.4±0.7Bc	19.7±1.9Cc	17.7±1.7Ab	373.80±7.28Bc	196.60±18.70Cc	177.20±16.62Ab
	50—60	1.53±0.16Aa	38.2±2.8ABc	23.1±1.7BCbc	15.1±1.1Ab	381.50±28.38ABc	230.50±17.42BCbc	151.00±11.31Ab
侧柏×灌木混交林	0—10	1.38±0.09Aa	48.5±3.8Ba	28.0±1.9Cab	20.5±1.9Ba	484.83±38.37Ba	280.16±19.14Cab	204.67±19.43Ba
	10—20	1.37±0.08ABa	46.9±2.8Bab	27.5±1.4CBab	19.4±1.6Ba	469.16±28.41Bab	274.75±14.03CBab	194.41±15.45Ba
	20—30	1.41±0.06Aa	46.6±3.1ABab	30.8±2.2Ba	15.9±1.2Bb	466.27±31.09ABab	307.70±21.87Ba	158.57±11.53Bb
	30—40	1.57±0.17Aa	42.3±2.8Ab	27.3±2.2Bab	15.0±0.5Bb	423.23±27.68Ab	273.18±22.44Bab	150.05±5.43Bb
	40—50	1.62±0.16Aa	41.5±2.3ABb	27.1±1.7Bab	14.4±1.4Bb	415.24±22.49ABb	270.97±16.93Bab	144.28±13.78Bb
	50—60	1.64±0.05Aa	39.3±2.0ABb	25.4±2.8Bb	13.9±0.8Ab	392.70±19.70ABb	253.77±27.50Bb	138.93±8.12Ab

注:不同小写字母代表同一植被类型不同土层深度差异显著,不同大写字母代表不同植被类型同一土层深度差异显著($p<0.05$)。

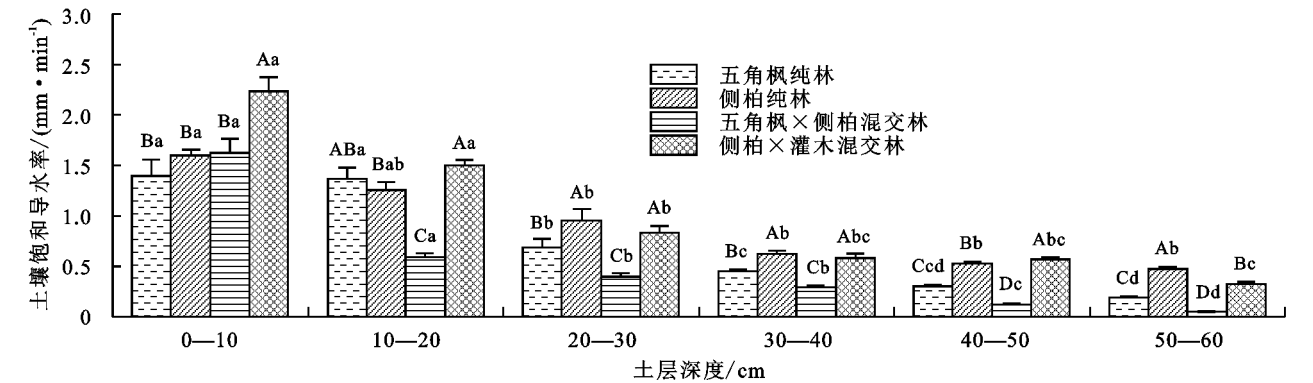


图 3 典型植被的土壤饱和和导水率

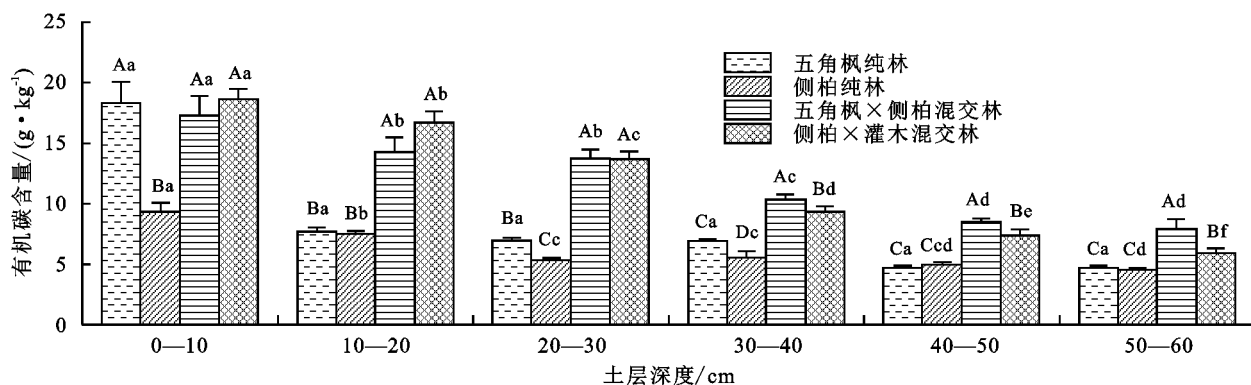


图4 典型植被土壤层的有机碳含量

4 讨论

4.1 典型植被枯落物层水文功能

根据排序,可以看出侧柏枯落物的总蓄积量显著小于其他3种植被类型,这与赵鹏等^[21]的研究结果一样。这是因为侧柏是常绿树种,不会集中在一个时间段内代谢产生枯落物,并且侧柏的分解速度非常快,这两个原因综合导致了侧柏枯落物蓄积量较小。且4种植被枯落物蓄积量都呈现了半分解层大于未分解层的规律,像侧柏×灌木混交林枯落物半分解层蓄积量甚至达到了未分解层的2.9倍。有研究表明,枯落物在野外分解一年的质量损失率10%~15%^[22]。因此,试验所采集的枯落物半分解层包含了枯落物的多年累积量。这也就导致了半分解层的蓄积量显著大于未分解层。

枯落物的吸水速率表现先高后低的过程。这是因为浸水前期,干燥的枯落物水势较低,外界降雨输入时在水势的作用下,水分易被枯落物所吸持,随着吸持水分的增加,枯落物对水分的吸持作用减弱,因此速率降低。通过比较吸水速率可以看出,半分解层速率显著大于未分解层。这是因为半分解层已经处于部分分解状态,相同质量的情况下表面积更大,更易吸持水分。侧柏纯林的吸水速率显著小于其他3种植被类型,这是因为侧柏属于针叶树种,表层含有较多的油脂,具有斥水性,使得侧柏的持水能力小于其他树种^[16]。通过回归分析,持水量、吸水速率和浸水时间之间呈现对数函数($R^2 > 0.915$)、幂函数关系($R^2 > 0.904$)。这与其他研究人员所得出的结论一致^[23]。枯落物的最大持水率为146.0%~485.9%,这与孙立博等^[10]的研究结果类似。而与许小明等^[24]的研究结果不同,这可能是环境不同导致的。枯落物在不同分解层的最大持水率,没有全部呈现半分解层大于未分解层这一规律,这和枯落物的形态结构有关,试验中所使用的五角枫枯落物,在野外风干与室内烘干之后,叶角

向内翻起,形成了一个“兜状”,而且枯落物堆积在一起也会形成复杂结构,能够存储更多水分。而侧柏枯落物呈现了这种规律,这是由于侧柏枯落物在经过一定程度的分解后,变成了小颗粒状,在相同质量的情况下表面积增大,能够有效增加与水分的接触面,有利于吸持水分^[25]。本试验侧柏纯林的持水、拦蓄参数均最小。这可能是因为侧柏是针叶林,水分可以轻松穿过针叶,对于降雨的持水率、拦蓄率低,且蓄积量也低于其他植被,因此持水量、拦蓄量也最小。

4.2 典型植被土壤层水文特征

所选择的4种植被类型,土壤容重沿着剖面向下逐渐增大,而总孔隙度呈现相反的规律。这和刘目兴等^[26]的结果一样。但是刘目兴的土壤容重范围从0.81~1.63 g/cm³,容重最大值达到了最小值的两倍,而本试验所得到的土壤容重1.29~1.64 g/cm³,与刘目兴的研究明显不一样,这可能是因为不同的研究区土壤类型不同所导致的。从植被类型来看,侧柏纯林的容重最小,这可能是由于侧柏属于针叶,对外界输入降雨的拦截能力弱。使得降雨更易穿透冠层与枯落物,打击地表从而使地表板结。本文所选择的典型植被不同土层的土壤毛管孔隙度均大于非毛管孔隙度,这与张晓梅等^[27]的结果相同。总孔隙度是两者的和,代表了土壤整体的疏松程度,本试验所得到的土壤总孔隙度36.0%~56.4%。这与姜淑兰等^[28]得到的结果40.4%~61.7%相比,孔隙度相对小,这可能是因为本试验在北京山区进行,相对于三峡库区纬度高、气温低、日照时间短,气候的差异导致植被根系发育与土壤生物活动都不如三峡库区强烈。

最大持水量和毛管持水量、非毛管持水量是直接体现蓄水性能的指标,由总孔隙度、毛管孔隙度、非毛管孔隙度经过计算得到。土壤最大持水量也称为土壤饱和持水量,表示了土壤蓄持水分的最大值,是体现土壤水源涵养能力的重要指标。土壤非毛管持水

量与土壤非毛管孔隙度紧密相关,外界水分输入土壤时,由于毛管孔隙的水分受基质势作用,成为了毛管水。此时外界输入水分运动主要在土壤非毛管孔隙中进行,因此对于外界水分输入的响应非常强烈,是体现土壤对输入水分调蓄能力的重要指标。土壤毛管持水量是土壤中微小的毛管孔隙中吸收和保持的水分,植物生长发育以及蒸腾用水的直接来源,具有重要的生态学意义。本试验中土壤最大持水量和土壤非毛管持水量最大值出现在侧柏纯林和五角枫×侧柏混交林,具有良好的水源涵养能力。

本试验土壤饱和导水率呈现沿着土层向下逐渐减小的规律,这与王子龙等^[29]的研究结果相同。这主要是因为越往下,土壤越被压实,大孔隙数量减少,抑制了水分的传导,同时,土壤深层石砾更多,大块的石砾截断了水流路径,阻碍了水分的传导。除此之外,表层的土壤饱和导水率均为此样地土壤层的最高值,且显著大于下面的土层,这与毛娜等^[30]的研究结果相同,这是因为表层是动植物活动最频繁的地方,枯落物分解、动物粪便产生的营养物质都会促进大孔隙产生,从而增加了土壤的导水能力。从植被类型来看,侧柏×灌木混交林和侧柏纯林的土壤饱和导水率最大,这是因为,侧柏和灌木都是浅根系植物,根系活动强烈,根系在土壤中的生长发育会疏松土壤,还会产生饱和水膜,有利于水分的传导,提高了土壤饱和导水率。

4.3 有机碳对于土壤水文功能的影响

本试验表层有机碳含量达到了整个0—60 cm土层有机碳含量的27.6%。这与王艳丽等^[31]的研究结果相同。这是因为表层直接接受枯落物分解的有机碳,同时表层的根系活动相对旺盛,根系分解以及释放根系分泌物输送有机碳的量更多。从植被类型来看,侧柏纯林的有机碳含量显著小于其他3种植被类型,这也与枯落物蓄积量相对应,这也间接说明了枯落物是土壤有机碳的重要来源。除了枯落物与根系分解、释放根系分泌物外,动物活动在地表留下的粪便也会带来有机碳^[32]。因此,表层的有机碳含量最高。

相关分析结果表明,有机碳含量与决定土壤持水能力的相关参数呈现显著相关关系,这与郭月峰等^[33]的研究结果相同。有研究认为,土壤有机碳通过影响土壤养分从而直接影响土壤孔隙度等性质,是孔隙度变化的直接驱动力^[34]。也有研究认为,有机碳作为一种胶结物质,可以将土壤中的黏粒、粉粒胶结在一起,促使其转化为团聚体,而土壤团聚体的增加有利于间隙的产生,从而改变了孔隙度和容重,进而改变了土壤持水

能力。还有研究认为,有机碳刺激土壤微生物的活动,产生胞外多糖和脂类等疏水性物质,从而加快团聚体形成和稳定,而土壤团聚体含量与土壤持水能力存在负相关关系^[35]。同时有机碳含量与土壤饱和导水率也呈现相关关系,这与Zhu等^[36]的结果相同,这是因为有机碳使得大孔隙数量增加,而大孔隙数量增加可以显著提高土壤饱和导水率^[26]。

5 结论

(1) 枯落物最大持水率、最大拦蓄率、有效拦蓄率最大值均为侧柏×灌木混交林。最大持水量、最大拦蓄量、有效拦蓄量最大值均为五角枫纯林。由此可知,侧柏×灌木混交林枯落物持水、拦蓄性能最佳,而五角枫纯林枯落物的持水、拦蓄能力最好。

(2) 所选植被土壤饱和持水量和毛管持水量最大值均为侧柏纯林,土壤非毛管持水量最大值为五角枫×侧柏混交林,平均土壤饱和导水率最大值为侧柏×灌木混交林。由此可知,纯林的持水能力优于混交林,且都远超枯落物的持水能力。而混交林的水分调蓄能力整体优于纯林。

(3) 土壤有机碳含量表现为沿剖面向下逐渐减小,且土壤有机碳含量与容重、总孔隙度、非毛管孔隙度、饱和导水率均呈显著相关($p < 0.05$)。表明有机碳对于改善土壤水文功能具有积极的意义,在今后应加强这一方面研究。

参考文献:

- [1] Tiemann A, Ring I. Towards ecosystem service assessment: Developing biophysical indicators for forest ecosystem services[J]. *Ecological Indicators*, 2022,137:108704.
- [2] Dunkerley D. Percolation through leaf litter: What happens during rainfall events of varying intensity[J]. *Journal of Hydrology*, 2015,525:737-746.
- [3] Pereira L C, Balbinot L, Lima M T, et al. Aspects of forest restoration and hydrology: The hydrological function of litter[J]. *Journal of Forestry Research*, 2021, 33:543-552.
- [4] 郑凯利,邓东周.若尔盖湿地土壤入渗性能及其影响因素[J].*水土保持研究*,2019,26(3):179-184,191.
- [5] Liu B, Fan H M, Han W, et al. Linking soil water retention capacity to pore structure characteristics based on X-ray computed tomography: Chinese Mollisol under freeze-thaw effect[J]. *Geoderma*, 2021,203:105322.
- [6] 李阳,万福绪.黄浦江中游5种典型林分枯落物和土壤水源涵养能力研究[J].*水土保持学报*,2019,33(2):264-271.
- [7] Jourgholami M, Sohrabi H, Venanzi R, et al. Hydro-

- logic responses of undecomposed litter mulch on compacted soil: Litter water holding capacity, runoff, and sediment[J]. *Catena*, 2022, 210:105875.
- [8] 朱万泽,盛哲良,舒树森.川西亚高山次生林恢复过程中土壤物理性质及水源涵养效应[J].*水土保持学报*, 2019, 33(6):205-212.
- [9] 赵阳,王飞,齐瑞,等.白龙江、洮河林区5种典型森林枯落物与土壤层水源涵养效应[J].*水土保持研究*, 2021, 28(3):118-125.
- [10] 孙立博,余新晓,陈丽华,等.坝上高原杨树人工林的枯落物及土壤水源涵养功能退化[J].*水土保持学报*, 2019, 33(1):104-110.
- [11] 侯瑞萍,张克斌,郝智如.造林密度对樟子松人工林枯落物和土壤持水能力的影响[J].*生态环境学报*, 2015, 24(4):624-630.
- [12] Chang Z Q, Ye X Y, Zhang J H. Soil water infiltration of Subalpine Shrub Forest in Qilian Mountains, Northwest of China[J]. *Agronomy Journal*, 2021, 113:829-839.
- [13] Qin Y W, Xiao X M, Wigneron J P, et al. Carbon loss from forest degradation exceeds that from deforestation in the Brazilian Amazon[J]. *Nature Climate Change*, 2021, 11:442-448.
- [14] Farooqi T J A, Li X H, Yu Z, et al. Reconciliation of research on forest carbon sequestration and water conservation[J]. *Journal of Forestry Research*, 2021, 32:7-14.
- [15] 孙拥康,汤景明,王怡.亚热带日本落叶松人工林枯落物及土壤层水文效应[J].*北京林业大学学报*, 2021, 43(8):60-69.
- [16] 王金悦,邓羽松,林立文,等.南亚热带5种典型人工林凋落物水文效应[J].*水土保持学报*, 2020, 34(5):169-175.
- [17] 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.
- [18] 张宇恒,张莉,张秀娟,等.退化程度对玛沁高寒草甸植物群落及土壤持水能力的影响[J].*草业科学*, 2022, 39(2):235-246.
- [19] 许艺馨,康扬眉,韩翠,等.降水量对荒漠草原凋落物—土壤碳氮磷生态化学计量学特征的影响[J].*中国草地学报*, 2022, 44(4):21-31.
- [20] 陈倩,周志立,史琛媛,等.河北太行山丘陵区不同林分类型枯落物与土壤持水效益[J].*水土保持学报*, 2015, 29(5):206-211.
- [21] 赵鹏,马佳明,李艳茹,等.太行山典型区域不同林分类型枯落物水文效应[J].*水土保持学报*, 2020, 34(5):176-185.
- [22] 李娜,赵传燕,郝虎,等.不同海拔条件下祁连山青海云杉林叶凋落物分解过程及养分的动态变化[J].*生态学报*, 2021, 41(11):4493-4502.
- [23] 公博,师忱,何会宾,等.冀北山区6种人工林的林地水源涵养能力[J].*干旱区资源与环境*, 2019, 33(3):165-170.
- [24] 许小明,邹亚东,孙景梅,等.黄土高原北洛河流域林地枯落物特征及水分吸持效应[J].*生态学报*, 2021, 41(13):5153-5165.
- [25] 胡静霞,杨新兵,朱辰光,等.冀西北地区4种纯林枯落物及土壤水文效应[J].*水土保持研究*, 2017, 24(4):304-310.
- [26] 刘目兴,吴丹,吴四平,等.三峡库区森林土壤大孔隙特征及对饱和导水率的影响[J].*生态学报*, 2016, 36(11):3189-3196.
- [27] 张晓梅,邸利,王彦辉,等.黄土高原典型林分土壤水文物理性质及持水性能[J].*甘肃农业大学学报*, 2019, 54(3):117-124, 133.
- [28] 姜淑兰,刘目兴,易军,等.三峡山地不同类型植被和坡位对土壤水文功能的影响[J].*生态学报*, 2019, 39(13):4844-4854.
- [29] 王子龙,赵勇钢,赵世伟,等.退耕典型草地土壤饱和导水率及其影响因素研究[J].*草地学报*, 2016, 24(6):1254-1262.
- [30] 毛娜,黄来明,邵明安.黄土区坡面尺度不同植被类型土壤饱和导水率剖面分布及影响因素[J].*土壤*, 2019, 51(2):381-389.
- [31] 王艳丽,字洪标,程瑞希,等.青海省森林土壤有机碳氮储量及其垂直分布特征[J].*生态学报*, 2019, 39(11):4096-4105.
- [32] Bengough A G. Water dynamics of the root zone: rhizosphere biophysics and its control on soil hydrology[J]. *Vadose Zone Journal*, 2012, 11: vzj2011, 0111, doi:10.2136/vzj2011.0111.
- [33] 郭月峰,祁伟,姚云峰,等.小流域梯田土壤有机碳与土壤物理性质的关系研究[J].*生态环境学报*, 2020, 29(4):748-756.
- [34] 祖元刚,李冉,王文杰,等.我国东北土壤有机碳、无机碳含量与土壤理化性质的相关性[J].*生态学报*, 2011, 31(18):5207-5216.
- [35] 王修康,戚兴超,刘艳丽,等.泰山山前平原3种土地利用方式下土壤结构特征及其对土壤持水性的影响[J].*自然资源学报*, 2018, 33(1):63-74.
- [36] Zhu P Z, Zhang G H, Zhang B J. Soil saturated hydraulic conductivity of typical revegetated plants on steep gully slopes of Chinese Loess Plateau[J]. *Geoderma*, 2022, 412:115717.