

# 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

赵 阳<sup>1,2</sup>, 王 飞<sup>1,2</sup>, 齐 瑞<sup>1,2</sup>, 陈学龙<sup>1,2</sup>, 雷 炜<sup>1,2</sup>, 曹秀文<sup>1,2</sup>, 刘锦乾<sup>1,2</sup>, 杨永红<sup>1,2</sup>

(1 甘肃省白龙江林业管理局林业科学研究所, 兰州 730070;

2 甘肃白龙江森林生态系统国家定位观测研究站, 甘肃 舟曲 746300)

**摘 要:**为了研究白龙江、洮河林区森林林地水源涵养效应,选取 5 种森林林下枯落物和土壤层为研究对象,采用浸水法、环刀法对其枯落物和土壤层持水功能进行定量研究。结果表明:5 种不同林型枯落物蓄积量差异不显著,最大持水量在 21.07~29.20 t/hm<sup>2</sup>,大小依次为冷杉林>栎类混交林>落叶松林>桦木林>油松林;枯落物持水量与浸水时间均符合  $Q=a\ln t+b$  的对数函数关系,吸水速率与浸水时间符合  $V=k \cdot t^n$  的幂函数关系;土壤层最大持水量在 2 848.97~3 168.15 t/hm<sup>2</sup>,大小为冷杉林>桦木林>栎类混交林>油松林>落叶松林;5 种林型 0—60 cm 土壤层最大持水量均占到林地持水总量的 99% 以上,林地水源涵养量在 2 876.63~3 197.35 t/hm<sup>2</sup>,大小为冷杉林>桦木林>栎类混交林>油松林>落叶松林。综合研究得出,林地水源涵养能力是林木种类、土壤、立地、气候等因子共同作用的结果,半分解层是枯落物持水的主体,土壤层是林地涵养水源的主体。

**关键词:**白龙江、洮河林区; 枯落物; 土壤; 水源涵养效应

中图分类号:S718.5

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2021)03-0118-08

## Water Conservation Effect of Litter and Soil Layer of Five Typical Forests in Bailongjiang and Taohe River Forest of Gansu

ZHAO Yang<sup>1,2</sup>, QI Rui<sup>1,2</sup>, WANG Fei<sup>1,2</sup>, CHEN Xuelong<sup>1,2</sup>,

LEI Wei<sup>1,2</sup>, CAO Xiuwen<sup>1,2</sup>, LIU Jinqian<sup>1,2</sup>, YANG Yonghong<sup>1,2</sup>

(1. Institute of Forestry Science of Bailongjiang in Gansu Province, Lanzhou 730070,

China; 2. GanSu Bailongjiang National Forest Ecosystem Research Station, Zhouqu, Gansu 746300, China)

**Abstract:** Five kinds of typical forests in Bailongjiang and Taohe River forest were taken as the research objects to study their forestland water conservation capacity. The research about the forest litter and soil water-holding capacity was carried out in the 5 typical forests by means of indoor immersion and cutting-ring method. The results show that there was no significant difference in litter accumulation among 5 different forest types, and the maximum water holding capacity was between 21.07~29.20 t/hm<sup>2</sup>, water holding capacity decreased in the order: *Abies faxoniana*>*Quercus liaotungensis*>*Larix gmelinii*>*Betula*>*Pinus tabulaeformis*; the relationship between water-holding capacity and immersion time of litter followed the logarithmic function ( $Q=a\ln(t)+b$ ), and the relationship between water absorption rate and soaking time followed the power function ( $V=k \cdot t^n$ ); water conservation capacity of soil layer was between 2 848.97~3 168.15 t/hm<sup>2</sup>, the maximum water capacity of soil layer decreased in the order: *Abies faxoniana*>*Betula*>*Quercus liaotungensis*>*Pinus tabulaeformis*>*Larix gmelinii*; the maximum water-holding capacity of 5 forest types accounted for more than 99% of the total water holding capacity of forestland, and water conservation capacity of forestland was between 2 876.63~3 197.35 t/hm<sup>2</sup>, water conservation capacity decreased in the order: *Abies faxoniana*>*Betula*>*Quercus liaotungensis*>*Larix gmelinii*>*Pinus tabulaeformis*. The semi-decomposed layer is the main body of litter water absorption, water conservation capacity of forestland is affected by forest species, soil, site and climate. Soil layer is the mainstay of water conservation of forestland.

收稿日期:2020-06-30

修回日期:2020-07-20

资助项目:甘肃林业科技创新项目(KJCX201909; KJCX202001); 甘肃省林业科技项目(2015kj051, 2016kj058)

第一作者:赵阳(1987—),男,甘肃合水人,高级工程师,硕士,主要从事森林生态研究。E-mail:573102514@qq.com

通信作者:杨永红(1968—),男,甘肃武都人,正高级工程师,学士,主要从事森林土壤研究。E-mail:173763825@qq.com

**Keywords:**Bailongjiang and Taohe river forest; litter; soil; water conservation function

白龙江、洮河林区地处甘肃南部山区与秦岭西段交汇处,属青藏高原与黄土高原过渡带,横跨长江与黄河流域上游交汇区,地形复杂生态系统类型多样。区内集成了森林资源、珍稀野生动植物资源、高原湿地和高原草甸等多种自然资源<sup>[1]</sup>,是甘肃乃至西北地区重要的生态屏障,对维系长江与黄河中下游地区的生态安全发挥着不可替代的作用。已有研究表明,白龙江与洮河林区的森林生态服务功能总价值分别达到 303.702 亿元/a,217.280 亿元/a,占甘肃全省的 20%以上<sup>[2-3]</sup>。以岷江冷杉(*Abies faxoniana*)、油松(*Pinus tabuliformis*)、辽东栎(*Quercus liaotungensis*)、落叶松(*Larix gmelinii*)、桦木(*Betula*)等为主要建群种的森林群落作为该区森林资源的重要组成部分,发挥着不可替代的生态作用。

水源涵养作为森林生态系统的重要功能,主要体现在森林植被层、枯枝落叶层及土壤层等对水分的调蓄和再分配上<sup>[4-5]</sup>,在水源涵养方面发挥主导作用的为土壤层和枯枝落叶层,因此以往森林水源涵养的研究中常用枯落物和土壤层的最大持水量来研究森林的水源涵养效应<sup>[6]</sup>。大量研究表明,不同林型其水源涵养效应存在明显差异<sup>[7-8]</sup>。白龙江、洮河林区森林类型多样,历史上经历过大规模采伐及林区居民长期生产活动干扰,生态环境脆弱易变,植被、土壤退化严重<sup>[9]</sup>。20 多年来随着“天保工程”实施,森林生态逐渐恢复。近年来,随着国家对生态文明重视程度的提高,森林环境进一步改善,生态功能恢复加快。目前,在白龙江林区不同植被类型枯落物和土壤持水的研究方面,冯宜明<sup>[10]</sup>、陈国鹏<sup>[11]</sup>、王飞<sup>[12]</sup>、杨永红<sup>[13]</sup>等做了大量研究,但这些研究均属小流域范围,不能完全反映林区水源涵养现状,而有关白龙江林区大范围

内林地水源涵养的研究尚不多见。为此,本研究以白龙、江洮河林区 5 种主要林型为对象,从枯落物和土壤层来综合研究林地水源涵养效应,为该区森林水源涵效益评价和森林生态效益评估提供理论参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

白龙江、洮河林区位于白龙江、洮河上游,地处青藏高原东部边缘黄土高原与甘肃南部山区交汇带(102°46'—104°52'E,33°04'—35°09'N),属青藏高原湿润气候区。地形以山地为主,山高谷深,相对高差大,海拔 2 900~4 300 m,小气候多样,灾害天气多发,水资源较为丰富。年均降水 646 mm,年均日照 2 276 h,年均温 5.8℃,无霜期 107 d。土壤主要为棕色灰化土、棕色森林土、褐色森林土及黄土<sup>[3]</sup>。森林以暗针叶林为主,覆盖率 60.57%,林下天然更新良好,森林结构相对完整,生态功能较强<sup>[14]</sup>。森林群落主要建群种为云、冷杉、油松、栎类、桦木、落叶松等,森林质量总体较高,野生动植物资源丰富。

1.2 研究方法

1.2.1 样地设置 2018 年 7—8 月,在对研究区与进行全面踏查后,选取车巴林场的岷江冷杉林,羊沙林场的桦木林,腊子口林场以辽东栎为主的栎类混交林,洛大林场的油松林以及大峪沟的落叶松林为研究对象,选择林相整齐的林分,设置 50 m×50 m 的样地各 3 块,逐一测量胸径( $D$ )≥5 cm 的全部乔木树种的胸径,树高,冠幅等指标,灌木层设置为 2 m×2 m,草本层 1 m×1 m,采用对角线法调查物种多样性,对乔木幼苗、幼树( $D<5$  cm)逐一测量并记录其高度,地径。各样地用 GPS 定位,记录其经纬度,海拔、坡度等因子。

表 1 样地基本信息

森林类型	海拔/m	坡向	平均胸径/cm	密度/(株·hm <sup>-2</sup> )	郁闭度/%	土壤类型
油松林(天然林)	2391~2999	半阴	20.94±3.71	1263.20±30.14	0.51	黄土
冷杉林(天然林)	3092~3172	半阴	22.40±4.03	2214.40±89.15	0.78	棕色森林土
栎类混交林(次生林)	2182~2412	阳坡	15.65±1.60	440.80±16.47	0.40	褐色森林土(石砾多)
桦木林(次生林)	2356~2558	阳坡	8.56±2.04	656.50±20.14	0.36	黄土
落叶松林(人工林)	2580~2689	半阴	16.50±2.11	1896.62±15.56	0.65	灰褐土(石砾多)

1.2.2 枯落物蓄积量及持水性测定 用 5 点法在各样地内取面积为 0.5 m×0.5 m 的典型样方,将枯落物分为木残体、未分解和半分解层(木残体层指落叶上层基本保持原状较粗的木质化的枝干脱落物;未分解层指基本保持原形状和质地的落叶、树皮、花、果

等;半分解层指植物组织为半分化状态或部分残余组织尚保持原形态)收集并称重后,置于 85℃烘箱中烘至恒重后称重,计算单位面积的枯落物蓄积量。枯落物持水量及吸水速率采用浸水法测定,将烘干后的枯落物装入尼龙网袋称重后浸水,分别测定浸水 0.5,1,

2,3,4,8,10,12,24 h 的质量变化,每次以无水滴滴下为标准进行称重,以此研究枯落物持水过程及吸水速率,并计算枯落物持水量和持水率。计算公式参见胡晓聪<sup>[15]</sup>、刘凯等<sup>[16]</sup>。

1.2.3 土壤物理性质及持水性测定 在各样地按照 5 点法挖土壤剖面,用环刀法分 4 层(0—10 cm,10—20 cm,20—40 cm,40—60 cm)取原状土,每层 4 个重复,测定土壤容重、干重等,以此计算土壤孔隙度、持水量等指标。测定及计算方法参见中华人民共和国林业行业标准——森林土壤水分—物理性质的测定(LY/T1215-1999)<sup>[17]</sup>。

1.2.4 数据处理 采用 Excel 软件进行相关数据的处理和绘图,用 SPSS 21.0 统计分析软件对重复观测结果进行单因素方差分析(ANOVA)和差异显著性检验(Duncan 法),并进行曲线拟合。

表 2 不同森林类型枯落物蓄积量

森林类型	木残体		未分解层		半分解层		总蓄积量/ (t·hm <sup>-2</sup> )
	蓄积量/(t·hm <sup>-2</sup> )	百分比/%	蓄积量/(t·hm <sup>-2</sup> )	百分比/%	蓄积量/(t·hm <sup>-2</sup> )	百分比/%	
油松林	4.69±0.05 <sup>Ab</sup>	36.91	3.47±0.07 <sup>Ba</sup>	27.23	4.56±0.52 <sup>Aa</sup>	35.86	12.73±0.75 <sup>a</sup>
冷杉林	4.80±0.25 <sup>Ab</sup>	33.99	3.39±0.39 <sup>Ba</sup>	24.01	5.94±2.51 <sup>Aa</sup>	42.00	14.59±2.17 <sup>a</sup>
栎类混交林	6.24±0.61 <sup>Aa</sup>	41.31	3.89±0.41 <sup>Ba</sup>	25.19	5.02±0.12 <sup>Aa</sup>	33.51	15.78±2.59 <sup>a</sup>
桦木林	4.35±0.01 <sup>Ab</sup>	33.86	3.66±0.54 <sup>Ba</sup>	28.76	4.74±0.37 <sup>Aa</sup>	37.39	12.74±1.98 <sup>a</sup>
落叶松林	3.59±0.00 <sup>Bb</sup>	25.99	4.58±0.00 <sup>Ba</sup>	33.22	5.63±0.13 <sup>Aa</sup>	40.79	13.80±0.37 <sup>a</sup>

注:不同大写字母表示同行之间存在显著差异,不同小写字母表示同列存在显著差异( $p<0.05$ )。

2.1.2 枯落物持水能力 由表 3 可知,5 种林型枯落物最大持水量在 21.07~29.20 t/hm<sup>2</sup>,其大小依次为冷杉林(29.20 t/hm<sup>2</sup>)>栎类混交林(28.29 t/hm<sup>2</sup>)>落叶松林(27.66 t/hm<sup>2</sup>)>桦木林(25.75 t/hm<sup>2</sup>)>油松林(21.07 t/hm<sup>2</sup>),油松林最大持水量显著小于其他 4 种林型。相同林型枯落物半分解层最大持水量均占枯落物层持水总量的 44%以上,显著高于( $p<0.05$ )木残体层与未分解层,木残体层与未分解层最大持水量除落叶松林外差异均不显著。比较不同林

## 2 结果与分析

### 2.1 不同森林类型枯落物层水文效应

2.1.1 枯落物蓄积量 由表 2 可知,5 种林型枯落物总蓄积量最大的为栎类混交林(15.78 t/hm<sup>2</sup>),其次是冷杉林(14.59 t/hm<sup>2</sup>),最小的为桦木林(12.48 t/hm<sup>2</sup>),但枯落物总蓄积量差异不显著( $p<0.05$ )。栎类混交林木残体比例(41.31%)显著高于其他 4 种林型,落叶松林木残体比例最小(25.99%)。通过分析不同分解程度枯落物蓄积量占总蓄积量的比例可知,5 种林型除落叶松林外(33.22%),未分解层的比例均不到总蓄积量的 30%,显著低于木残体和半分解层比例,半分解层除栎类混交林外都接近于总蓄积量的 40%,可见半分解层在枯落物组分中占据主导地位,其次为木残体层。

型枯落物相同组分发现,木残体除落叶松林,未分解和半分解层除油松林外,其他 4 种林型枯落物相同组分最大持水量差异不显著。

枯落物不同组分平均最大持水率在 164.88%~205.29%,最大的仍为冷杉林,油松林持水率显著低于其他 4 种林型。5 种林型枯落物最大持水率最大的均为半分解层,显著大于木残体层。除油松林外,其他 4 种林型未分解层最大持水率显著高于木残体层,半分解层高于未分解层。

表 3 不同森林类型枯落物持水状况

森林类型	最大持水量/(t·hm <sup>-2</sup> )				最大持水率/%			
	木残体	未分解层	半分解层	总和	木残体	未分解层	半分解层	平均
油松林	6.14±1.47 <sup>Bab</sup>	5.43±0.15 <sup>Bb</sup>	9.51±0.82 <sup>Ab</sup>	21.07±1.23 <sup>b</sup>	130.67±14.51 <sup>Bab</sup>	156.67±2.49 <sup>Bb</sup>	208.34±1.93 <sup>Ab</sup>	164.88±12.64 <sup>b</sup>
冷杉林	7.68±0.16 <sup>Ba</sup>	7.47±0.66 <sup>Bab</sup>	14.05±0.24 <sup>Aa</sup>	29.20±4.59 <sup>a</sup>	159.67±10.85 <sup>Ba</sup>	219.84±15.66 <sup>Aa</sup>	236.36±16.76 <sup>Aa</sup>	205.29±13.34 <sup>a</sup>
栎类混交林	7.02±0.68 <sup>Ba</sup>	8.82±0.27 <sup>Ba</sup>	12.45±0.93 <sup>Aa</sup>	28.29±2.88 <sup>a</sup>	112.33±13.02 <sup>Bb</sup>	231.45±21.10 <sup>Aa</sup>	245.59±15.52 <sup>Aa</sup>	196.45±27.33 <sup>a</sup>
桦木林	5.75±0.88 <sup>Bab</sup>	8.38±0.66 <sup>Ba</sup>	11.62±1.13 <sup>Aa</sup>	25.75±1.89 <sup>a</sup>	132.33±12.23 <sup>Bab</sup>	229.00±9.09 <sup>Aa</sup>	240.02±5.35 <sup>Aa</sup>	200.49±14.84 <sup>a</sup>
落叶松林	4.61±0.12 <sup>Cb</sup>	9.55±0.03 <sup>Ba</sup>	13.49±0.73 <sup>Aa</sup>	27.66±1.34 <sup>a</sup>	128.00±10.15 <sup>Bab</sup>	210.32±4.78 <sup>Aa</sup>	237.67±4.80 <sup>Aa</sup>	192.18±12.15 <sup>a</sup>

注:同行不同大写字母表示同一林型不同层次之间存在显著差异,同列不同小写字母表示不同林型存在显著差异( $p<0.05$ )。

2.1.3 枯落物持水过程 由图 1 可知,5 种林型枯落物持水过程基本一致,均在浸水之初持水量迅速增加,随着浸水时间的延长,持水量增加逐渐减缓,直至后期逐渐饱和。5 种林型木残体层在浸水 0~4 h 内持水量迅速增加,0.5 h 内持水量均已接近饱和持水

量的 50%,4 h 内持水量达到 80%以上,8~10 h 持水量已达到 95%以上并逐渐接近饱和。未分解层在 0.5 h 内持水量达到 60%以上,2 h 后均已达到 80%以上,4 h 后持水量接近饱和。而半分解层在浸水 0.5 h 内持水量均达到 70%以上,2 h 内已达到 90%

以上,并逐渐接近饱和。对 5 种林型枯落物持水量与浸水时间的关系进行拟合,得出二者呈对数函数关系

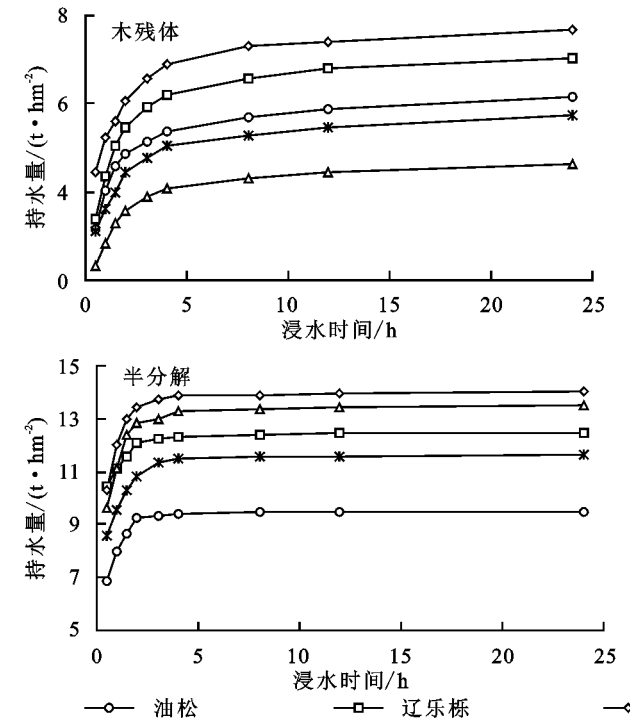


图 1 不同森林类型枯落物持水过程

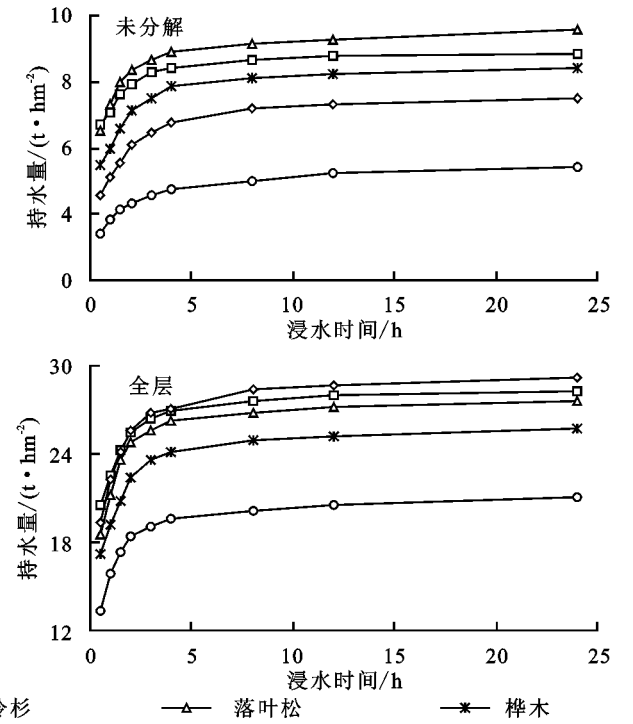
2.1.4 吸水速率 由图 2 可知,5 种林型枯落物各层吸水速率变化一致,均随浸水时间的增加吸水速率逐渐降低,不同林型吸水速率大小均为半分解层>未分解层>木残体层。总体来看,浸水之初 0.5 h 内枯落物吸水速率均最大,其大小为栎类混交林>冷杉林>落叶松林>桦木林>油松林,2 h 内吸水速率迅速降低,随后随着浸水时间的增加吸水速率逐渐降低,8~10 h 后吸水速率接近于 0,说明此时枯落物持水量已接近饱和。对 5 种林型枯落物吸水速率与浸水时间的关系进行拟合,得出二者之间呈幂函数关系(表 4),关系式为: $V=k \cdot t^{-n}$ ,式中: $V$  为吸水速率 $[t/(hm^2 \cdot h^{-1})]$ ;  $t$  为浸水时间(h);  $k$  为系数,  $n$  为指数。

森林类型	持水率与时间		吸水速率与时间	
	关系式( $p<0.0001$ )	$R^2$	关系式( $p<0.0001$ )	$R^2$
油松林	$Q=3.216\ln(t)+13.809$	0.993	$V=16.132t^{-0.897}$	0.998
冷杉林	$Q=4.863\ln(t)+18.395$	0.993	$V=22.196t^{-0.894}$	0.998
栎类混交林	$Q=3.025\ln(t)+21.427$	0.989	$V=23.636t^{-0.932}$	0.999
桦木林	$Q=3.924\ln(t)+17.014$	0.982	$V=20.018t^{-0.903}$	0.998
落叶松林	$Q=4.183\ln(t)+18.240$	0.989	$V=21.370t^{-0.901}$	0.998

2.2 不同森林类型土壤水文效应

2.2.1 土壤容重与孔隙度 由表 5 可知,5 种林型土壤容重均随土层深度的加深呈现显著增大现象。在 0—20 cm 土层,冷杉林土壤容重最小,在 0—60 cm

(表 4),关系式为: $Q=a\ln(t)+b$ ,式中: $Q$  为持水量 $(t/hm^2)$ ;  $t$  为浸水时间(h);  $a$  为系数;  $b$  为常数。



土层范围内,冷杉林土壤容重变化最大,从 520.40 mg/cm<sup>3</sup>增加到 1 302.71 mg/cm<sup>3</sup>,增加了 2.503 倍,其他 4 种林型其容重增加均不到 1.5 倍。土壤容重平均值为冷杉林(941.61 mg/cm<sup>3</sup>)<栎类混交林(964.47 mg/cm<sup>3</sup>)<油松林(1 017.34 mg/cm<sup>3</sup>)<桦木林(1 021.14 mg/cm<sup>3</sup>)<落叶松林(1 108.25 mg/cm<sup>3</sup>),但彼此差异不显著。

在 0—60 cm 土层范围内,毛管孔隙度、非毛管孔隙度和土壤总孔隙度均随着土层深度加深而减小,与土壤容重变化相反。土壤总孔隙度在 40.56%~69.95%变化,毛管孔隙度 37.33%~65.71%变化,土壤平均总孔隙度大小依次为冷杉林(55.66%)>桦木林(53.92%)>栎类混交林(53.21%)>油松林(50.32%)>落叶松林(49.35%),但差异不显著。平均毛管孔隙度为冷杉林(53.10%)>桦木林(47.91%)>油松林(47.10%)>落叶松林(45.75%)>栎类混交林(44.30%),差异也不显著。

2.2.2 土壤层持水能力 5 种林型土壤层持水能力见表 5,在 0—60 cm 土层,油松、栎类混交林和桦木林的土壤自然含水量随着土层深度的增加逐渐减小,冷杉林与落叶松林则逐渐增大,土壤层平均自然含水量大小依次为冷杉林(609.85 t/hm<sup>2</sup>)>落叶松林(245.04 t/hm<sup>2</sup>)>栎类混交林(211.24 t/hm<sup>2</sup>)>油松林(177.97 t/hm<sup>2</sup>)>桦木林(139.84 t/hm<sup>2</sup>),其中冷杉林自然含水量显著大于其他 4 种林型。5 种林



型平均最大持水量与有效持水量差异均不显著。有效持水量占最大持水量的比例大小依次为冷杉林

(89.26%)>油松林(87.18%)>落叶松林(84.97%)>桦木林(77.57%)>栎类混交林(74.12%)。

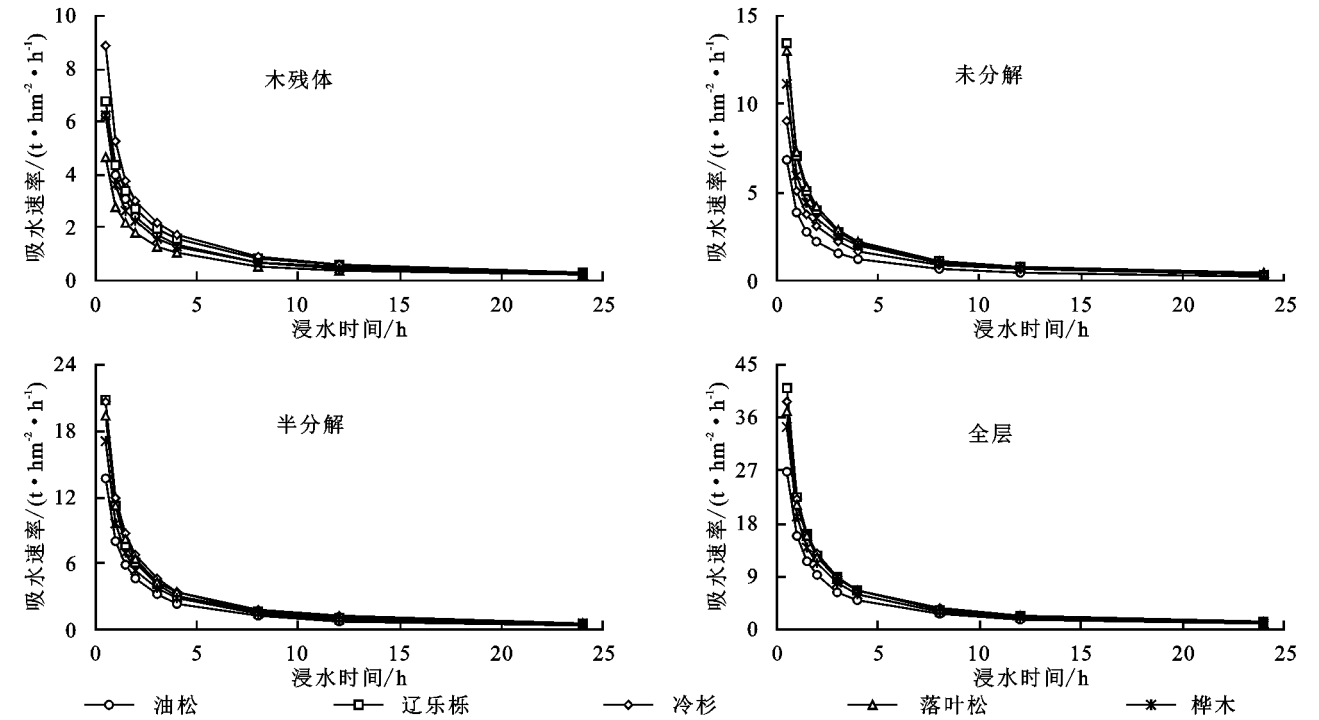


图 2 不同森林类型枯落物吸水速率的变化

表 5 不同森林类型土壤物理性质

森林类型	土层/ cm	土壤容重/ ( $\text{mg} \cdot \text{cm}^{-3}$ )	毛管孔隙度/%	非毛管 孔隙度/%	总孔隙度/ %	自然含水量/ ( $\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$ )	最大持水量/ ( $\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$ )	有效持水量/ ( $\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$ )
油松林	0—10	900.68±17.76 <sup>Ab</sup>	47.78±4.36 <sup>ABa</sup>	4.00±1.23 <sup>Ca</sup>	51.28±3.49 <sup>Ca</sup>	138.56±27.06 <sup>C</sup>	512.81±34.98 <sup>C</sup>	442.10±39.55 <sup>B</sup>
	10—20	1112.97±46.23 <sup>Anb</sup>	46.95±5.67 <sup>An</sup>	3.21±0.62 <sup>Ba</sup>	50.16±1.95 <sup>Ba</sup>	138.85±19.33 <sup>BC</sup>	501.62±50.95 <sup>B</sup>	441.16±63.61 <sup>AB</sup>
	20—40	1119.86±38.57 <sup>Bab</sup>	46.66±4.79 <sup>An</sup>	3.09±0.91 <sup>An</sup>	49.75±3.09 <sup>An</sup>	282.23±55.22 <sup>B</sup>	995.26±78.18 <sup>A</sup>	914.06±64.75 <sup>A</sup>
	40—60	1145.85±14.63 <sup>Ba</sup>	47.08±0.77 <sup>An</sup>	2.50±0.01 <sup>An</sup>	49.58±0.78 <sup>An</sup>	152.25±23.90 <sup>C</sup>	991.18±15.41 <sup>A</sup>	982.90±26.61 <sup>A</sup>
	均值	1017.54±31.60 <sup>A</sup>	47.12±3.70 <sup>A</sup>	3.20±0.67 <sup>B</sup>	50.32±3.12 <sup>A</sup>	177.97±34.42 <sup>B</sup>	750.29±68.18 <sup>A</sup>	695.06±64.70 <sup>A</sup>
冷杉林	0—10	520.40±16.81 <sup>Bc</sup>	65.71±0.11 <sup>An</sup>	4.24±0.24 <sup>Ca</sup>	69.95±0.35 <sup>An</sup>	565.60±6.23 <sup>A</sup>	699.51±3.52 <sup>A</sup>	595.20±1.04 <sup>A</sup>
	10—20	896.95±27.91 <sup>Bab</sup>	56.43±0.96 <sup>Ab</sup>	2.06±0.01 <sup>Bb</sup>	58.49±0.95 <sup>Ab</sup>	470.90±21.88 <sup>A</sup>	584.85±9.49 <sup>A</sup>	533.55±5.74 <sup>A</sup>
	20—40	1046.31±18.04 <sup>ABa</sup>	49.67±0.55 <sup>Ab</sup>	1.86±0.27 <sup>Ab</sup>	51.52±2.85 <sup>ABc</sup>	773.40±47.57 <sup>A</sup>	1030.51±5.48 <sup>AB</sup>	935.70±10.91 <sup>A</sup>
	40—60	1302.71±57.41 <sup>An</sup>	40.60±4.04 <sup>Bc</sup>	2.07±0.23 <sup>Ab</sup>	42.66±3.81 <sup>BCd</sup>	629.51±90.47 <sup>A</sup>	853.30±76.26 <sup>BC</sup>	764.10±78.51 <sup>AB</sup>
	均值	941.61±27.81 <sup>A</sup>	53.10±0.88 <sup>A</sup>	2.55±0.18 <sup>B</sup>	55.66±0.69 <sup>A</sup>	609.85±43.39 <sup>A</sup>	792.24±33.73 <sup>A</sup>	707.14±24.78 <sup>A</sup>
栎类混交林	0—10	932.20±40.09 <sup>Ab</sup>	43.87±2.29 <sup>Ca</sup>	13.27±0.22 <sup>An</sup>	57.12±2.05 <sup>BCa</sup>	140.66±6.29 <sup>C</sup>	571.20±20.51 <sup>BC</sup>	353.95±13.76 <sup>C</sup>
	10—20	918.35±33.16 <sup>Bb</sup>	44.54±3.84 <sup>An</sup>	12.16±0.14 <sup>An</sup>	56.66±0.69 <sup>ABa</sup>	102.95±17.21 <sup>C</sup>	566.60±16.99 <sup>AB</sup>	357.50±22.17 <sup>B</sup>
	20—40	989.85±6.61 <sup>ABa</sup>	44.46±2.83 <sup>An</sup>	5.14±0.85 <sup>Ab</sup>	49.63±1.98 <sup>ABb</sup>	241.85±46.65 <sup>B</sup>	992.60±39.38 <sup>AB</sup>	804.60±59.92 <sup>A</sup>
	40—60	1017.47±2.97 <sup>Ca</sup>	44.35±1.32 <sup>ABa</sup>	4.12±0.38 <sup>Ab</sup>	48.50±5.14 <sup>ABb</sup>	359.51±15.30 <sup>B</sup>	978.01±10.28 <sup>AB</sup>	787.36±32.28 <sup>AB</sup>
	均值	964.47±9.66 <sup>A</sup>	44.30±2.57 <sup>A</sup>	8.67±1.51 <sup>A</sup>	53.21±1.05 <sup>A</sup>	211.24±13.95 <sup>B</sup>	776.87±26.66 <sup>A</sup>	575.85±28.15 <sup>A</sup>
桦木林	0—10	926.90±2.88 <sup>Ad</sup>	51.17±2.36 <sup>ABa</sup>	9.16±3.00 <sup>Ba</sup>	60.33±2.12 <sup>Ba</sup>	132.94±23.42 <sup>C</sup>	603.25±21.28 <sup>B</sup>	455.95±27.79 <sup>B</sup>
	10—20	988.82±3.75 <sup>Bc</sup>	49.23±2.57 <sup>An</sup>	6.28±1.89 <sup>ABa</sup>	55.51±1.71 <sup>ABab</sup>	105.27±10.51 <sup>C</sup>	555.12±7.25 <sup>AB</sup>	425.61±42.14 <sup>AB</sup>
	20—40	1055.54±0.56 <sup>ABb</sup>	45.89±3.51 <sup>An</sup>	4.17±1.99 <sup>An</sup>	50.07±2.64 <sup>ABb</sup>	136.81±17.58 <sup>B</sup>	1001.31±52.18 <sup>AB</sup>	791.93±105.33 <sup>A</sup>
	40—60	1115.35±7.77 <sup>BCa</sup>	45.35±3.34 <sup>ABa</sup>	4.42±1.24 <sup>An</sup>	49.78±2.10 <sup>Ab</sup>	184.33±4.56 <sup>BC</sup>	995.50±42.08 <sup>A</sup>	774.11±99.94 <sup>AB</sup>
	均值	1021.65±53.25 <sup>A</sup>	47.91±8.74 <sup>A</sup>	6.01±2.07 <sup>AB</sup>	53.92±10.58 <sup>A</sup>	139.84±12.92 <sup>B</sup>	788.81±71.41 <sup>A</sup>	611.91±18.11 <sup>A</sup>
落叶松林	0—10	856.20±66.13 <sup>Ab</sup>	52.95±2.85 <sup>Ba</sup>	2.54±0.30 <sup>Ca</sup>	55.48±3.13 <sup>BCa</sup>	274.13±16.14 <sup>B</sup>	554.85±31.38 <sup>BC</sup>	503.06±24.44 <sup>B</sup>
	10—20	944.27±52.95 <sup>Bb</sup>	49.78±2.61 <sup>Anb</sup>	4.66±0.75 <sup>Ba</sup>	54.43±1.37 <sup>ABa</sup>	195.22±38.49 <sup>B</sup>	544.33±13.73 <sup>AB</sup>	463.66±28.31 <sup>AB</sup>
	20—40	1267.07±36.59 <sup>An</sup>	42.93±0.43 <sup>ABc</sup>	3.99±0.07 <sup>An</sup>	46.92±2.64 <sup>Bb</sup>	267.87±71.82 <sup>B</sup>	938.53±49.28 <sup>B</sup>	771.86±19.36 <sup>A</sup>
	40—60	1365.47±42.85 <sup>An</sup>	37.33±1.87 <sup>Bc</sup>	3.23±0.63 <sup>An</sup>	40.56±0.58 <sup>Cb</sup>	242.93±92.10 <sup>BC</sup>	811.26±11.61 <sup>C</sup>	682.26±59.45 <sup>B</sup>
	均值	1108.25±53.33 <sup>A</sup>	45.75±0.32 <sup>A</sup>	3.6±1.62 <sup>B</sup>	49.35±1.29 <sup>A</sup>	245.04±16.46 <sup>B</sup>	712.21±41.27 <sup>A</sup>	605.21±20.54 <sup>A</sup>

注: 同列不同小写字母表示相同植被类型不同土层差异显著, 同列不同大写字母表示不同植被类型相同土层差异显著 ( $p<0.05$ )。

5种林型0—60 cm土层冷杉林总自然含水量(2 439.41 t/hm<sup>2</sup>)最高,并显著高于其他4种林型,是最小的桦木林(559.33 t/hm<sup>2</sup>)的4.36倍。最大持水量仍以冷杉林(3 168.15 t/hm<sup>2</sup>)最高,显著高于最低的落叶松林(2 848.97 t/hm<sup>2</sup>),与桦木林(3 155.27 t/hm<sup>2</sup>)、栎类混交林(3 107.46 t/hm<sup>2</sup>)和油松林(3 001.10 t/hm<sup>2</sup>)无显著差异。由此可见,除落叶松林外,其他4种林型土壤层涵养水源能力相当。5种林型土壤层有效持水量大小依次为冷杉林(2 828.55 t/hm<sup>2</sup>)>油松林(2 780.23 t/hm<sup>2</sup>)>桦木林(2 447.61 t/hm<sup>2</sup>)>落叶松林(2 420.87 t/hm<sup>2</sup>)>栎类混交林(2 303.41 t/hm<sup>2</sup>),彼此差异均不显著。

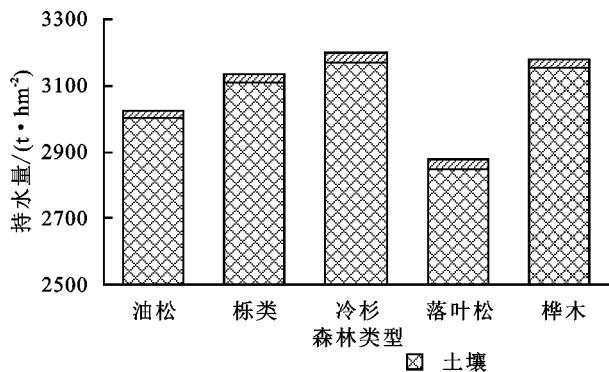


图3 不同森林类型林地水源涵养能力

## 3 讨论

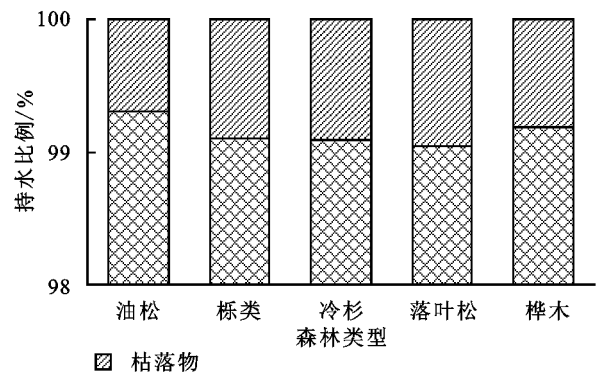
### 3.1 不同林型枯落物层水文特征

枯落物持水能力多用干物质的最大持水率和最大持水量表示,其大小与森林类型,枯落物组成及分解程度有关<sup>[18]</sup>,由枯落物蓄积量和持水特性共同决定<sup>[9]</sup>,蓄积量受植被类型、立地条件、气候、季节等多因素影响<sup>[19]</sup>。本研究的5种林型中,落叶松、桦木和栎类均为落叶树种,因此其枯落物蓄积量还与采样季节有关,本研究采样时间为7月,因此3种叶落树种还尚未达到枯枝落叶大量凋落的季节,所以落叶树种的枯落物蓄积量必会受到影响。

胡淑萍等<sup>[20]</sup>认为阔叶树枯落物持水能力普遍高于针叶树,本研究中,枯落物持水量大小为冷杉林>栎类混交林>落叶松林>桦木林>油松林,持水率为冷杉林>桦木林>栎类混交林>落叶松林>油松林。本研究认为,无论针叶和阔叶林,还是常绿和落叶林,枯落物持水能力受树种、立地条件、林分密度和郁闭度及其所形成的水热条件的综合影响,持水量主要受蓄积量影响,持水率主要受分解程度影响。调查研究发现,冷杉林郁闭度大,林下环境湿润,枯落物成分复杂分解程度高,因此持水能力强,油松林郁闭度小,林内湿度低,枯落物结构单一分解程度低,因此持水能

### 2.3 不同森林类型林地持水能力

森林持水能力一般用土壤层和枯落物层的持水总量来评价,林地持水量是反映林地水源涵养能力的重要指标之一,5种不同林型的林地持水总量大小依次为冷杉林(3 197.35 t/hm<sup>2</sup>)>桦木林(3 181.02 t/hm<sup>2</sup>)>栎类混交林(3 135.76 t/hm<sup>2</sup>)>油松林(3 022.18 t/hm<sup>2</sup>)>落叶松林(2 876.63 t/hm<sup>2</sup>),可见5种林型中冷杉林林地的水源涵养能力最强,其次为桦木林和栎类混交林,落叶松林最小。不同林型枯落物层持水量均不到林地持水总量的1%,说明土壤层是林地水源涵养的主体,发挥着99%以上的水源涵养效应(图3)。



力弱。相同林型枯落物半分解层最大持水量与持水率均显著高于未分解层与木残体层,说明半分解层是枯落物发挥持水功能的主体,这与周志立等<sup>[21]</sup>的研究一致。木残体分解程度越高储水潜力越大<sup>[22]</sup>,栎类混交林枯落物蓄积量最大但持水量小于冷杉林,是因为木残体比例偏高且木质坚硬不易分解,因此持水能力未充分发挥,桦木林亦是如此。

5种林型中,栎类混交林枯落物蓄积量最大,冷杉林枯落物蓄积量小于栎类,但分解程度高,因此二者吸水速率快,油松林枯落物蓄积量小且分解程度低,因此吸水速率最慢。不同林型枯落物吸水速率最快均为半分解层。5种林型枯落物持水量与浸水时间均符合  $Q = a \ln t + b$  的对数函数关系,吸水速率与浸水时间符合  $V = k \cdot t^n$  的幂函数关系。这与陈倩等<sup>[23]</sup>的研究一致。

### 3.2 不同林型土壤层水文特征

土壤容重和孔隙度是决定土壤水源涵养效应的重要因素<sup>[21]</sup>,孔隙度影响着土壤持水性能<sup>[24]</sup>。孔隙度大则土壤容重小,持水能力强,孔隙度小则土壤紧实,持水能力弱。本研究中,5种不同林型0—60 cm土层,土壤容重均随土层深度增加而增大,孔隙度随深度增加而减小,上层土壤持水能力大于下层土壤,这与范少辉等<sup>[25]</sup>的研究一致。

林地土壤自然含水量除与物质本身有关外,还与降水、林分郁闭度、光照等因素有关<sup>[22]</sup>。油松、栎类和桦木林的林分郁闭度小,因此林地的蒸发导致上层土壤自然含水量小于深层,冷杉与落叶松林郁闭度大,对林地水分的保护作用强,因此土壤自然含水量高。

植被类型不同,土壤容重和孔隙度必然存在差异。本研究中,5种林型土壤总孔隙度大为小冷杉林>桦木林>栎类混交林>油松林>落叶松林,容重变化与之相反。孔隙度决定土壤持水能力,容重和孔隙度不同反映了土壤层持水能力的差异,因此最大持水量与孔隙度变化一致,即冷杉林土壤层持水能力最强,其次为桦木林,落叶松林最小。此外,土壤持水性能还与土壤质地、成分、石砾含量等因素有关<sup>[26]</sup>,本研究中,5种林型土壤质地不同,栎类混交林和落叶松林土壤均含石砾,因此必然会影响到其持水能力。本研究认为,无论针叶和阔叶林、还是常绿和落叶林,其土壤层持水能力及孔隙度等物理性质是林地水热条件、生物、微生物等因子长期共同作用的结果,受林木种类、密度、郁闭度等多因素影响。

### 3.3 不同林型林地水源涵养效应

林地水源涵养能力主要体现在枯落物层和土壤层<sup>[27]</sup>,因此许多研究<sup>[23-24]</sup>采用枯落物和土壤层的持水量之和来评价林地水源涵养效应。本研究发现,由于立木密度、林冠层郁闭度不同,不同林型林内水热的再分配存在巨大差异,因此枯落物组成和分解程度各不相同,土壤质地、结构不同其持水能力也存在差异。因此本研究认为,林地水源涵养能力是林木种类、土壤、立地、气候等因子共同作用的结果。5种林型林地水源涵养量在2 876.63~3 197.35 t/hm<sup>2</sup>,0—60 cm土壤层最大持水量均占林地持水总量的99%以上,冷杉林林地水源涵养效应最强。

调查研究可知,冷杉作为甘南亚高山白龙江、洮河林区广泛分布的顶级天然林群落,经过长期的自然选择形成了稳定的结构,具有强大的生态功能,油松林老龄化林木较多且自然更新不良,桦木林和栎类混交林多为次生林,易受外界干扰,群落结构和生态功能均不如冷杉林稳定,落叶松人工林群落结构单一,生态功能较弱。5种林型林地水源涵养能力为冷杉林>桦木林>栎类混交林>油松林>落叶松林,证明了冷杉林群落在甘南亚高山地区水源涵养方面举足轻重的地位,也证明了不同林型在维护本林区生态系统稳定中的不同价值。

本研究从中度流域尺度上研究了种林型林地水源涵养效应,对本研究区森林水源涵养评价具有一定参考价值。森林水源涵养能力的体现除枯落物和土

壤层外还主要体现在森林植被层上<sup>[4]</sup>,因此,关于本研究区森林水源涵养的研究仍需要在今后工作中持续开展。

## 4 结论

(1) 5种林型枯落物蓄积量差异不显著,最大持水量在21.07~29.20 t/hm<sup>2</sup>,大小依次为冷杉林>栎类混交林>落叶松林>桦木林>油松林,半分解层蓄积量最大,是持水的主体;枯落物持水量与浸水时间均符合 $Q=a \ln t+b$ 的对数函数关系,吸水速率与浸水时间符合 $V=k \cdot t^n$ 的幂函数关系。

(2) 5种林型0—60 cm土壤层最大持水量在2 848.97~3 168.15 t/hm<sup>2</sup>,大小为冷杉林>桦木林>栎类混交林>油松林>落叶松林。

(3) 林地水源涵养效应是林木种类、土壤、立地、气候等因子共同作用的结果,土壤层是林地水源涵养的主体,5种林型0—60 cm土层最大持水量均占到林地持水总量的99%以上,林地最大持水量在2 876.63~3 197.35 t/hm<sup>2</sup>,大小为冷杉林>油松林>栎类混交林>桦木林>落叶松林。

### 参考文献:

- [1] 马斌.甘肃甘南尕斯库勒—则岔国家级自然保护区有效性评价[D].兰州:兰州大学,2016.
- [2] 冯宜明,车克钧,曹秀文,等.甘肃省白龙江林区主要森林类型生态服务功能价值评估[J].中南林业科技大学学报,2014,34(10):102-106.
- [3] 邱书志,王伟,丁骞,等.洮河林区森林生态系统服务功能及价值评估[J].中南林业科技大学学报,2018,38(2):97-102.
- [4] 孙浩,刘晓勇,何齐发,等.修河上游流域4种森林类型的水源涵养功能评价[J].水土保持研究,2017,24(4):337-341,348.
- [5] 齐特,李玉婷,何会宾,等.冀北地区丰宁县水源林地水源涵养能力[J].中国水土保持科学,2016,14(3):60-67.
- [6] 宣立辉,康凡,谷建才,等.冀北地区典型林分枯落物层与土壤层的水文效应[J].水土保持研究,2018,25(4):86-91.
- [7] 陈继东,周长亮,李惠丽.接坝地区9种典型林分类型枯落物层和土壤层水文效应[J].水土保持研究,2017,24(6):216-221,226.
- [8] 石小亮,张颖,单永娟,等.云南省高原典型森林植被涵养水源功能研究[J].长江流域资源与环境,2015,24(8):1366-1372.
- [9] 齐瑞,杨永红,陈宁,等.白龙江上游5种典型灌木林枯落物蓄积量及持水特性[J].水土保持学报,2016,30(6):123-127.
- [10] 冯宜明,李毅,曹秀文,等.甘肃南部不同密度云杉人工

- 幼林的林分结构特征及土壤理化性质[J].林业科学, 2018,54(10):20-30.
- [11] 陈国鹏,曹秀文,王会儒,等.白龙江干旱河谷岩生植物持水性能[J].水土保持学报,2014,28(1):102-105.
- [12] 王飞,陈国鹏,齐瑞,等.甘南白龙江上游小流域主要林分地被物层的持水特性分异[J].水土保持研究,2016,23(6):242-247.
- [13] 杨永红,王飞,曹秀文,等.甘南白龙江上游高山林线过渡区地被物及土壤水文特性[J].水土保持研究,2018,25(2):145-150.
- [14] 许幼霞,周旭,赵娟,等.半湿润半干旱过渡区洮河流域植被盖度变化特征[J].水土保持通报,2016,36(6):308-314.
- [15] 胡晓聪,黄乾亮,金亮.西双版纳热带山地雨林枯落物及其土壤水文功能[J].应用生态学报,2017,28(1):55-63.
- [16] 刘凯,贺康宁,田赟,等.青海高寒山区 5 种林分的土壤特性及其水源涵养功能[J].水土保持学报,2017,31(3):141-146.
- [17] 国家林业局.中华人民共和国林业行业标准:森林土壤水分—物理性质的测定[S].中国林业科学研究院,1999,LY/T 1215-1999.
- [18] 涂志华,范志平,孙学凯,等.大伙房水库流域不同植被类型枯落物层和土壤层水文效应[J].水土保持学报,2019,33(1):127-133.
- [19] 袁杰,曹广超,曹生奎,等.祁连山南坡不同植被类型枯落物及其土壤持水特性分析[J].生态科学,2018,37(5):180-190.
- [20] 胡淑萍,余新晓,岳永杰.北京百花山森林枯落物层和土壤层水文效应研究[J].水土保持学报,2008,22(1):146-150.
- [21] 周志立,张丽玮,陈倩,等.木兰围场 3 种典型林分枯落物及土壤持水能力[J].水土保持学报,2015,29(1):207-213.
- [22] 王飞,郭星,陈国鹏,等.甘肃白龙江亚高山杜鹃粗木质残体腐烂程度与持水性能研究[J].西藏大学学报:自然科学版,2015,30(1):44-49.
- [23] 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.
- [24] 杨建伟,杨建英,何会宾,等.冀北山区滦平县 4 种新造林地水源涵养能力研究[J].生态学报,2019,39(18):6731-6737.
- [25] 范少辉,赵建诚,苏文会,等.不同密度毛竹林土壤质量综合评价[J].林业科学,2015,51(10):1-9.
- [26] 丁全定,刘锦乾,付作霖,等.白龙江上游主要灌丛土壤入渗性能分异性[J].广西林业科学,2017,46(3):303-307.
- [27] 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.



(上接第 117 页)

- [19] Mann H B. Nonparametric tests against trend [J]. *Econometrica*, 1945,13(3):245-259.
- [20] Kendall M G. Rank correlation methods[M]. London: Griffin, 1975.
- [21] 桑燕芳,王中根,刘昌明.小波分析方法在水文学研究中的应用现状及展望[J].地理科学进展,2013,32(9):1413-1422.
- [22] 者萌,张雪芹,沈鹏珂,等.京津冀地区 1957—2017 年气温变化时空格局[J].水土保持研究,2020,27(5):194-201.
- [23] 冯禹昊,朱江玲.基于 Morlet 小波的辽河径流量变化及其成因分析[J].水土保持研究,2019,26(2):208-215.
- [24] 徐建华.现代地理学中的数学方法[M].北京:高等教育出版社,2002.
- [25] 蓝永超,钟英君,吴素芬,等.天山南、北坡典型河流出山径流对气候变化响应的分析对比[J].中国沙漠,2011,31(1):254-260.
- [26] 周俊菊,雷莉,石培基,等.石羊河流域河川径流对气候与土地利用变化的响应[J].生态学报,2015,35(11):3788-3796.
- [27] 朱丽蓉,刘宇航,叶长青.海南岛干旱地区昌化江径流变化及影响因素[J].生态科学,2020,39(1):183-189.
- [28] 代晓颖,许有鹏,林芷欣,等.长江下游秦淮河流域径流变化及影响因素分析[J].水土保持研究,2019,26(4):68-73.