

DOI: 10.20103/j.stxb.202312192763

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. 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. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(17): 7662-7672.

祁连山东部地区不同林分水源涵养能力综合评估

王作泉, 贺康宁*

北京林业大学水土保持学院水土保持国家林业局重点实验室, 北京 100083

摘要: 研究对比祁连山东部地区典型林分水源涵养能力变化规律及差异, 以期为区域森林水源涵养能力提升和管理提供科学依据。以青海互助北山国家森林公园内的云杉纯林、白桦纯林、云杉白桦混交林、云杉青杨混交林、白桦青杨混交林和白桦落叶松混交林为研究对象, 采用野外实测、称量、室内浸泡等方法对林地林冠层、枯落物层和土壤层的水文效应进行测定分析, 通过敏感性分析和相关性分析选取林冠截留率、未分解层厚度、饱和导水率和土壤蓄水能力等 8 个指标, 并采用熵权法和综合指数法对林地水源涵养能力进行评估。研究结果表明: 祁连山东部地区 6 种典型林分林冠层、枯落物层和土壤层的水源涵养能力都受到林分类型的影响。(1) 不同林分类型林冠层植被截留能力表现为针叶林>阔叶林, 混交林>阔叶纯林;(2) 枯落物的厚度和储量变化趋势一致, 云杉纯林(针叶纯林)表现为未分解层>半分解层, 其他林分类型(针阔混交林、阔叶混交林和阔叶纯林)均表现为未分解层<半分解层。(3) 土壤孔隙度和饱和导水率整体上表现为混交林大于纯林, 且针阔混交林更优。(4) 6 种典型林分水源涵养能力的综合评估结果表明: 云杉白桦混交林(0.746)>白桦落叶松混交林(0.547)>云杉青杨混交林(0.504)>白桦青杨混交林(0.480)>白桦纯林(0.467)>云杉纯林(0.244)。综合来看, 针阔混交林可以作为区域林分结构调整和营造新林的目标林分类型, 特别是云杉白桦混交林和白桦落叶松混交林, 同时, 在新造林时, 应避免直接营造云杉纯林。

关键词: 人工林; 林分结构; 林冠层; 水源涵养能力

Comprehensive assessment of water conservation capacity in different forest stands in the eastern Qilian Mountains

WANG Zuoxiao, HE Kangning*

Key Laboratory of Soil and Water Conservation State Forestry Administration, Soil and Water Conservation college, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China

Abstract: This research aims to study the variations and differences in the water conservation capacity of typical forest stands in the eastern Qilian Mountains, and provide scientific support for the enhancement and management of regional forest water conservation capacity. The study focuses on six types of forests in the Beishan National Forest Park, including pure spruce forests, pure birch forests, mixed spruce-birch forests, mixed spruce-poplar forests, mixed birch-poplar forests, and mixed birch-larch forests. Field measurements and weighing, indoor soaking, ring cutting method, and correlation analysis methods are adopted to determine and analyze the hydrological effects of the forest canopy, litter layer, and soil layer. Eight indicators including canopy interception rate (%), undecomposed layer thickness (cm), saturated hydraulic conductivity (mm/min), and soil water storage capacity (%) were selected through sensitivity analysis and correlation analysis, and entropy weights method and comprehensive index method were used to evaluate the water conservation capacity of forest land. Results indicate that the water conservation capacities of the forest canopy, litter layer, and soil layer in the six typical forest stands in the eastern Qilian Mountains were affected by the type of forest stand. (1) The interception

基金项目: 青海省科技厅项目(2020-ZJ-713); 青海省科技厅项目(2022-SF-160)

收稿日期: 2023-12-19; 网络出版日期: 2024-06-26

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: hkn@bjfu.edu.cn

capacity of canopy vegetation in different forest stand types is as follows: coniferous forest>broad-leaved forest, mixed forest>pure broad-leaved forest. (2) The thickness and storage of litter showed a consistent trend, with pure spruce forests (needleleaf pure forests) having an undecomposed layer>semi-decomposed layer, while other forest types (needle-broadleaf mixed forests, broadleaf mixed forests, and broadleaf pure forests) had an undecomposed layer<semi-decomposed layer. (3) The overall soil porosity and saturated hydraulic conductivity showed that the mixed forests are greater than pure forests, with needle-broadleaf mixed forests are better. (4) The comprehensive evaluation of the water conservation capacity of the six typical forest stands reveals that mixed spruce-birch forests (0.746)>mixed birch-larch forests (0.547)>mixed spruce-poplar forests (0.504)>mixed birch-poplar forests (0.480)>pure birch forests (0.467)>pure spruce forests (0.244). As a whole, needle-broadleaf mixed forests could be considered as the target forest stand for regional forest structure adjustment and new forest establishment, especially mixed spruce-birch forests and mixed birch-larch forests were preferred. Directly establishing pure spruce forests should be avoided during creating new forests.

Key Words: plantation forest; stand structure; vegetation layers; water conservation capacity

森林生态系统的水源涵养能力是以水文学过程和机制为核心的复杂物理过程,是森林生态系统最重要的生态服务功能之一,对全球生态系统和人类经济社会发展有着至关重要的作用^[1-3],主要涉及林冠层对降水的再分配、枯落物层对地表径流的影响,以及森林对土壤水文物理特性的改善等多个方面的过程^[4-5]。林冠层通过对降雨进行层层拦截,将降雨分为穿透雨、林冠截留和树干径流^[6-7];而后,枯落物层减缓径流流速、增加地表粗糙度、吸附降雨并减缓土壤蒸发^[8-9];森林土壤层存蓄降水、减少地表径流,并及时补充壤中流和地下水^[10-12]。大量研究结果表明,不同林分类型的林龄^[13-14]、群落结构、物种多样性和土壤特性均存在一定的差异,从而导致林地的水源涵养能力不同^[15-17]。因此,深入了解不同林地的水源涵养能力,对经营人工林和提高区域森林生态系统的水源涵养能力具有极其重要的意义,特别是降水稀缺、蒸发较大的干旱半干旱区。

祁连山是我国重要的生态安全屏障区,具有水源涵养、生物多样性保护等生态功能,其高寒生态系统的高效与稳定是西北干旱半干旱地区水资源供给的重要保障,一旦遭遇破坏,极难恢复^[18-19]。祁连山东部地区,现存大面积的人工林,其多起源于 20 世纪 80 年代国家提倡的“西北植树种草活动”,后经数期“三北防护林建设工程”、“天然林保护工程”和“退耕还林还草工程”形成了目前的规模^[16,20]。由于造林初期未充分考虑造林树种的生物学和生态学特性,导致林地出现了稳定性差、水源涵养能力不佳等问题^[18]。因此,亟需确定合理的林分配置,以指导现有人工用材林的林分结构调控和后期的造林工作。近年来,诸多学者采用主成分分析法^[21]、模糊物元法^[20]、熵权法^[11, 17]、综合指数法^[22]和水量平衡方程^[23]对不同区域林地水源涵养能力进行了研究。然而,这些研究大多数忽略了林冠层对水源涵养的贡献,未能充分表征不同林分类型之间水源涵养能力的差异。因此,本文采用熵权法和综合指数法,从林冠层、枯落物层和土壤层三个方面的持水能力进行了林地水源涵养能力的比较分析,以期掌握不同植被配置模式下林地的水源涵养能力,为该区域人工用材林向生态公益林近自然管理转化和新林的营造提供理论指导。

1 材料和方法

1.1 研究区概况

研究区位于青海省海东市互助北山国家森林公园(102°00′—102°43′E, 36°42′—37°06′N),海拔 2100—4308m。平均气温 5.8℃,极端高温为 30.3℃,极端低温为-26.9℃;年均降水量 477.4mm,主要集中在每年 6—9 月,年蒸发量 1198.3mm,属于半干旱区域,土壤类型主要有山地栗钙土、山地褐色针叶林土和高山灌丛草甸土等。森林植被资源丰富,造林树种主要有青海云杉(*Picea crassifolia*)、白桦(*Betula platyphylla*)、青杨(*Populus cathayana*)、华北落叶松(*Larix principis-rupprechtii*)、祁连圆柏(*Juniperus przewalskii*)。

1.2 样地的设置与调查

本研究于 2021—2022 年 6—8 月在北山国家森林公园内选取坡形、坡度和坡向基本一致的云杉纯林、白桦纯林、云杉白桦混交林、云杉青杨混交林、云杉落叶松混交林和白桦青杨混交林,每种林分类型至少选择 3 个 24m×24m 的标准样地,合计 27 个样地。采用样地调查的方法进行每木检尺,以样方左下角的树木为坐标原点,采用手持 GPS 定位后,测量每棵树与坐标原点的相对位置和角度,并记录海拔等立地信息(表 1)。在每个样地内按五点取样法布设五个 25cm×25cm 的小样方,用钢尺测量枯落物厚度,并将枯落物带回实验室烘干备用。在样地的对角线自上而下选取 3 个点,采用 TWS-55 型渗透仪配套环刀和普通环刀分别在 0—20cm、20—40cm 和 40—60cm 土深进行取样,每层取 3 个重复,用于测定土壤持水性能和物理性质(本研究采用 3 层的平均值进行统计分析)。

表 1 样地基本信息表(均值±标准差)
Table 1 Basic information table of sample plots (Mean±SD)

样地数量 Plot quantity	林分类型 Stand type	平均胸径/cm Mean diameter at breast height	平均树高/m Mean tree height	林分密度 Density/ (株/hm ²)	郁闭度 Canopy density	海拔 Altitude/m	坡度 Slope/(°)
6	PcK	12.20±1.15	9.76±1.35	3217±527	0.8±0.04	2774±20	27.5±6.7
6	BpS	11.56±2.32	5.88±2.51	2158±706	0.6±0.14	2754±42	36.7±5.8
3	PcK×BpS	9.50±1.68	6.71±1.04	2960±1075	0.8±0.20	2690±75	35.7±4.9
3	PcK×PcR	13.93±1.23	9.96±0.67	2490±644	0.8±0.10	2709±47	32.7±4.9
6	BpS×PcR	15.39±3.50	9.63±2.84	1476±463	0.8±0.05	2714±68	37.5±6.9
3	BpS×LpM	13.85±2.43	7.96±1.00	1422±162	0.7±0.12	2650±32	36.0±4.4

PcK:云杉纯林 *Picea crassifolia*; BpS:白桦纯林 *Betula platyphylla*; PcK×BpS:云杉白桦混交林 *Picea crassifolia*×*Betula platyphylla*; PcK×PcR:云杉青杨混交林 *Picea crassifolia*×*Populus cathayana*; BpS×PcR:白桦青杨混交林 *Betula platyphylla*×*Populus cathayana*; BpS×LpM:白桦落叶松混交林 *Betula platyphylla*×*Larix principis-rupprechtii*

1.3 指标测定

(1) 林冠截留率

林冠层作为森林生态系统拦蓄降水的第一个作用层,对降雨具有重要的调节作用^[7]。林冠截留量等于林外降雨减去树干流和穿透雨量,通常树干流不足总降雨量的 1%^[24—25],故本研究将林外降雨量与穿透雨的差值作为林冠截留量。林冠截留率是林冠截留量跟降雨量的比值,可以很好的表征不同植被对降雨的截留能力。

本研究采用野外观测的方法对生长季的降雨进行测定,共观测降雨事件 46 次,累计降雨量 332.58mm。观测时,在林内和林窗分别放置 4 个直径 35cm,高 30cm 的塑料桶,作为简易的雨量桶,收集降水量,各塑料桶的间隔大于 2m,降雨量记为 Q_1 ,林内降雨量记为 Q_2 ^[24]。

$$\text{林冠截留率} = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} \times 100\% \tag{1}$$

(2) 枯落物持水性能测定

采用浸泡法测定枯落物的自然含水率、蓄积量、持水量(率)及有效拦蓄量^[5,16]。计算公式如下:

$$R_0 = \frac{M_0 - M_1}{M_1} \times 100\% \tag{2}$$

$$R_m = \frac{M_2 - M_1}{M_1} \times 100\% \tag{3}$$

$$W = (0.85 \times R_m - R_0) \times M \tag{4}$$

式中: M_0 为枯落物鲜重(g); M_1 为枯落物烘干重(g); R_0 为枯落物自然含水率(%); M_2 为枯落物浸泡 24 h 的重量(g); R_m 为枯落物最大持水率(%); W 为枯落物有效拦蓄量(t/hm²); M 为枯落物蓄积量(t/hm²)。

(3) 土壤物理性质和持水性能测定

采用烘干法和浸泡法计算土壤密度、孔隙度和田间持水量^[17,26],土壤饱和导水率测定所使用的仪器为 TWS-55 型渗透仪,以恒定水头法测定,并利用达西定律进行相关计算^[21-22]。

$$K_s = \frac{Q \times L \times 600}{S \times t \times H} \quad (5)$$

式中: K_s 为土壤饱和导水率 (mm/min); Q 为 10mL; L 为环刀高 (cm); S 为环刀横截面积 (cm²); t 为排出 10mL 水所需要的时间 (s); H 为水头差 (cm)。

1.4 指标筛选

干旱半干旱区,森林水源涵养功能突出表现为林地的蓄水、保水能力,影响林地蓄水、保水能力的因子主要通过林冠层、枯落物层和土壤层 3 个作用层次来表征,基于前人^[11-12,22,27]研究初步选定林冠截留率、未分解层厚度、半分解层厚度、未分解层蓄积量、半分解层蓄积量、未分解层最大持水量、半分解层最大持水量、饱和导水率、非毛管蓄水能力、毛管蓄水能力等 10 个指标,对各指标进行敏感性分析和 Pearson 相关性检验,剔除变异系数较小且相关性较高的指标,从而确定最终的指标体系。

为消除所选指标量纲不同的影响,本研究运用极值法对各指标进行标准化处理,所有指标均为正相关^[20],公式如下:

$$A_{ij} = [A'_{ij} - A'_{\min ij}] / [A'_{\max ij} - A'_{\min ij}] \quad (6)$$

式中: A_{ij} 为第 i 个林型第 j 个评价指标标准化值; A'_{ij} 为第 i 个林型第 j 个评价指标的实测值; $A'_{\min ij}$ 、 $A'_{\max ij}$ 为评价指标中的最小值和最大值。

1.5 评价模型

为评估不同林分类型的水源涵养能力,采用熵权法和综合指数法计算各林地的水源涵养能力得分,指数越大表明水源涵养能力越好^[17],计算公式如下:

$$WCI_i = \sum_{j=1}^n S'_{ij} \times W_j \quad (7)$$

式中: WCI_i (water conservation index) 为第 i 样地水源涵养能力综合指数; S'_{ij} 为第 i 样地第 j 指标的标准化得分; W_j 为第 j 指标的权重; i 为样地号; j 水源涵养能力评价指标。

1.6 数据处理与分析

采用 Excel 2016 进行数据整理,SPSS 20.0 进行统计分析,并采用 Duncan's multiple range tests 进行差异显著性检验 ($P < 0.05$),使用 Origin 2022 中 Correlation Plot 模块进行 Pearson 相关性热图的制作,文中数据均以平均值±标准差表示。

2 结果与分析

2.1 林冠层截留分析

各林分类型的林冠截留量如图 1 所示。由图可知,不同林分类型的截留量存在显著差异 ($P < 0.05$),林冠截留量最大的为云杉白桦混交林 (95.97mm),其次为云杉纯林 (94.51mm),再次为云杉青杨混交林、白桦青杨混交林和白桦落叶松混交林,其数值分别为 86.03mm、80.18mm 和 77.41mm,且这三种林分类型之间不存在显著差异 ($P > 0.05$),相比之下,白桦纯林 (64.49mm) 最小。整体表现为针叶林 > 阔叶林,混交林 > 阔叶纯林。

不同林分类型林冠截留率如图 2 所示。整体截留率介于 19.39%—28.86% 之间,云杉白桦混交林的截留率最大,为 28.86%,而白桦纯林的截留率最小,为 19.39%,最大值是最小值的 1.46 倍。整体而言,云杉纯林和其他几种混交林的林冠截留能力均较优。

2.2 枯落物层持水特性分析

2.2.1 不同林分类型枯落物厚度及储量

由图 3 可知,6 种林分类型枯落物未分解层和半分解层厚度变化趋势一致,总厚度在 1.99—5.12cm 之间,

从大到小为白桦纯林、云杉白桦混交林、白桦落叶松混交林、白桦青杨混交林、云杉青杨混交林和云杉纯林。方差分析表明林分类型对枯落物的厚度具有显著影响,并进一步采用多重比较验证,结果显示白桦纯林显著大于其他林分类型($P<0.05$)。

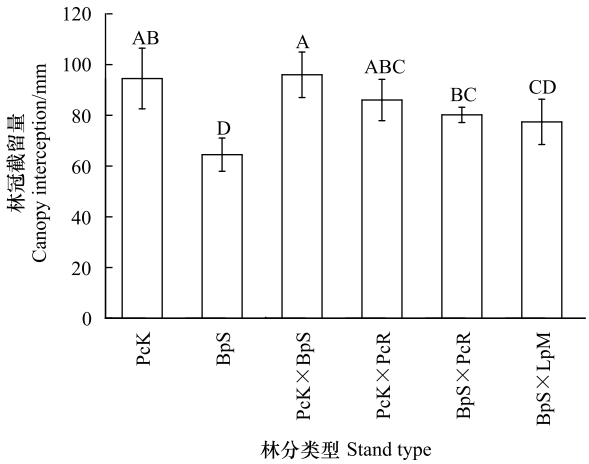


图1 不同林分类型林冠截留量

Fig.1 Canopy interception of different stand types

不同字母表示差异显著($P<0.05$),只在同一指标内进行比较

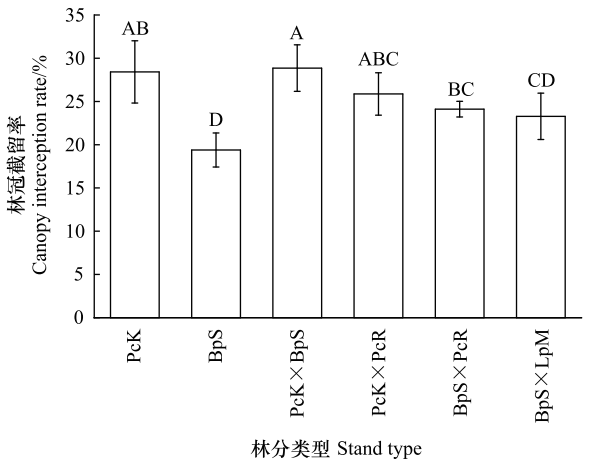


图2 不同林分类型林冠截留率

Fig.2 Canopy interception rate of different stand types

由图4可知,枯落物总蓄积量在13.16—21.92t/hm²之间,白桦纯林最大,其次为白桦落叶松混交林和云杉白桦混交林,云杉纯林最小,最大值是最小值的1.67倍;未分解层蓄积量最大的是白桦纯林(10.15t/hm²),其次是白桦落叶松混交林,而云杉纯林和云杉青杨混交林相对较小;半分解层蓄积量则表现为白桦落叶松混交林(12.44t/hm²)、白桦纯林(11.77t/hm²)和云杉白桦混交林(10.84t/hm²)显著大于其他林分类型($P<0.05$),云杉纯林(4.86t/hm²)明显小于其他林分类型。总的来看,不同林分类型的枯落物蓄积量存在显著差

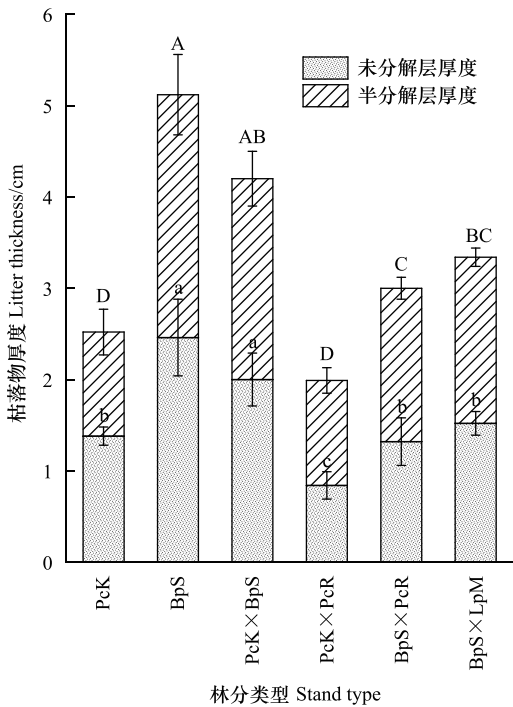


图3 不同林分类型枯落物厚度

Fig.3 Litter thickness of different stand types

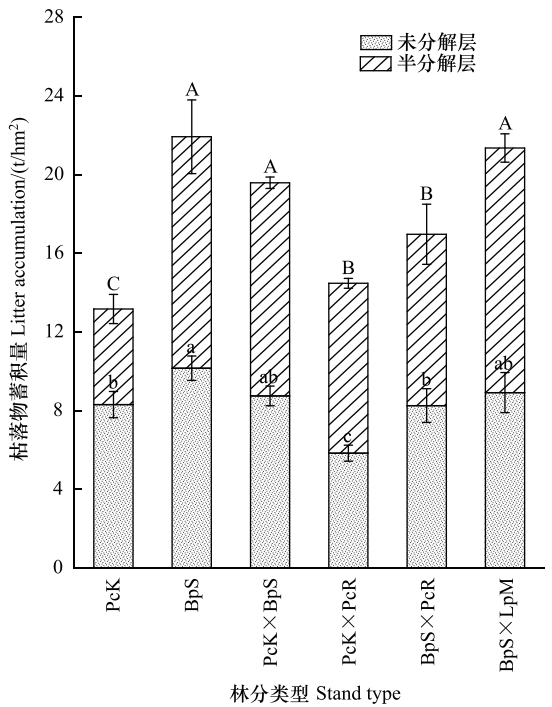


图4 不同林分类型枯落物蓄积量

Fig.4 Litter accumulation of different stand types

异($P<0.05$),其中白桦纯林和白桦落叶松混交林的蓄积量远远大于其他林分类型。不同类型林分的蓄积量总体上未分解层小于半分解层,唯一例外是云杉纯林。从枯落物厚度和蓄积量来看,白桦纯林和白桦落叶松混交林为较优林分。

2.2.2 不同林分类型枯落物持水能力分析

由表 2 可知,未分解层落物持水性能表现为云杉白桦混交林最大,云杉纯林最小,二者与其他林分类型之间均存在显著性($P<0.05$);半分解层枯落物持水性能表现为云杉白桦混交林、白桦纯林和白桦青杨混交林相对较大,白桦落叶松混交林和云杉青杨混交林次之,云杉纯林最小。总体而言,针阔混交林>阔叶混交林(阔叶纯林)>针叶纯林。从枯落物持水能力分析可知,云杉白桦混交林为较优林分。

表 2 不同林分类型枯落物持水能力
Table 2 Water holding capacity of litter of different stand types

林分类型 Stand type	未分解层最大持水量/(t/hm^2) Maximum water holding capacity of undecomposed layer	半分解层最大持水量/(t/hm^2) Maximum water holding capacity of half decomposition layer	总和/(t/hm^2) Sum
PcK×BpS	24.57±1.50a	31.33±0.81a	55.89±2.32a
BpS×LpM	22.19±6.14a	27.71±0.26a	49.90±6.23ab
BpS×PcR	22.69±1.16a	26.34±4.76a	49.04±4.83ab
BpS	21.37±1.12a	27.41±2.71a	48.78±3.58b
PcK×PcR	16.38±2.51b	20.72±2.48b	37.09±3.37c
PcK	13.21±1.32b	10.74±1.9c	23.95±3.1d

不同字母表示差异显著($P<0.05$),只在同一指标内进行比较

2.3 土壤层持水特性分析

土壤层的水源涵养能力由土壤类型决定,同时也受到地上植被的影响,水分能够顺利入渗是土壤调蓄水分的基础,而土壤的入渗性能跟孔隙度和饱和导水率等指标密切相关^[28]。本文选择 0—60cm 土层平均孔隙度、饱和导水率和持水能力来研究各林分类型土壤层的水源涵养特性。

由表 3 可知,不同林分类型的非毛管孔隙度之间存在显著差异($P<0.05$),表现为云杉白桦混交林、白桦青杨混交林和云杉青杨混交林显著大于其他林分类型($P<0.05$),云杉纯林最小;毛管孔隙度和总孔隙度在不同林分类型之间变化趋势一致,均为云杉白桦混交林最大,云杉青杨混交林和白桦落叶松混交林次之,白桦青杨混交林、白桦纯林和云杉纯林相对较小,且相对较小的三种林分类型之间不存在显著差异($P>0.05$),土壤孔隙度整体表现为针阔混交林>阔叶林(纯林)。不同林分类型毛管蓄水能力和非毛管蓄水能力的变化趋势相对一致,云杉白桦混交林最大,云杉纯林和白桦纯林相对较小。

表 3 不同林分类型土壤物理性质
Table 3 Soil physical properties of different stand types

林分类型 Stand type	非毛管孔隙度 Noncapillary porosity/%	毛管孔隙度 Capillary porosity/%	总孔隙度 Total porosity/%	非毛管蓄水能力 Non-capillary water storage capacity/ (t/hm^2)	毛管蓄水能力 Capillary storage capacity/ (t/hm^2)	总蓄水能力 Total water storage capacity/ (t/hm^2)
PcK×BpS	5.24±0.24a	56.07±0.56a	61.31±0.78a	314±14a	3364±33a	3679±47a
BpS×PcR	4.74±0.62a	49.52±3.14b	54.27±3.00b	285±37a	2971±18b	3256±18b
PcK×PcR	4.71±0.11a	53.45±0.82ab	58.16±0.92ab	282±6a	3207±49ab	3490±55ab
BpS	3.76±0.66b	48.64±4.79b	52.4±5.16b	226±40b	2918±28b	3144±31b
BpS×LpM	3.27±0.07bc	52.72±0.48ab	55.99±0.43ab	196±40ab	3163±29ab	3359±26ab
PcK	2.89±0.33c	49.58±4.46b	52.47±4.34b	173±20c	2975±26b	3148±26b

土壤饱和导水率主要反映土壤渗透性能和水流通量,由图 5 可以看出,不同林分类型饱和导水率的差异相对较小,表现为云杉白桦混交林(1.16mm/min)和云杉青杨混交林(1.19mm/min)的数值显著高于其他林分

类型 ($P<0.05$) ; 白桦落叶松混交林 (0.88mm/min)、白桦纯林 (0.86mm/min)、白桦青杨混交林 (0.83mm/min) 和云杉纯林 (0.72mm/min) 之间不存在显著差异 ($P>0.05$), 整体上表现为混交林大于纯林, 针阔混交林大于阔叶混交林, 从土壤层蓄水保水能力来看, 云杉白桦混交林和云杉青杨混交林可以作为区域新林营造的目标林分类型。

2.4 不同配置模式下林地水源涵养能力评估

2.4.1 综合评价指标的选取

水源涵养能力评价初选指标描述性统计结果如表 4 所示。变异系数值最大的是未分解层厚度, 其次是未分解层最大持水量, 最小的是毛管蓄水能力。

Pearson 相关性分析的结果如图 6 所示, 半分解的厚度与未分解层厚度和半分解蓄积量呈显著正相关 ($r>0.5, P<0.05$), 半分解层蓄积量和半分解层最大持水量呈显著正相关 ($r>0.5, P<0.05$)。

在剔除相关性显著指标时, 优先保留变异系数较大的指标, 从而得到最终的评价指标体系。最终选择的指标有林冠截留率、未分解层厚度、半分解层蓄积量、未分解层最大持水量、半分解层最大持水量、饱和导水率、非毛管蓄水能力、毛管蓄水能力等 8 个指标。

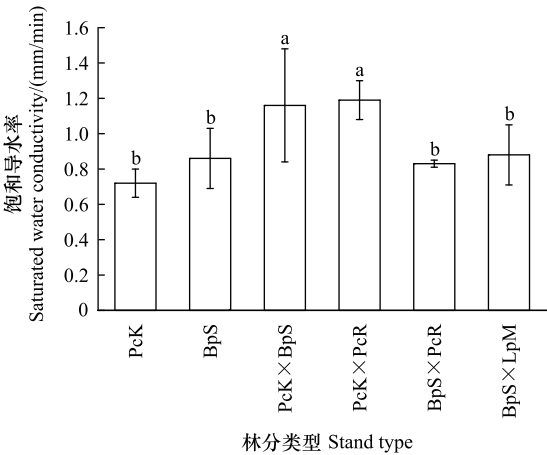


图 5 不同林分类型土壤饱和导水率
Fig.5 Soil saturated water conductivity of different stand types

表 4 水源涵养能力评价初选指标特征描述

Table 4 Description of primary indexes of water conservation capacity evaluation

指标 Index	取值范围 Value range	均值 Mean	标准差 Standard deviation	变异系数/% Coefficient of variation
林冠截留率 Canopy interception rate/%	19.39—28.86	24.99	3.54	14.15
未分解层厚度 Thickness of undecomposed layer/cm	0.84—2.46	1.55	0.59	38.39
半分解层厚度 Half decomposition layer thickness/cm	1.15—2.66	1.82	0.55	30.38
未分解层蓄积量 Undecomposed reservoir volume/(t/hm ²)	4.86—11.77	8.14	2.47	30.39
半分解层蓄积量 Volume of semi-decomposition layer/(t/hm ²)	8.25—12.44	9.77	1.68	17.24
未分解层最大持水量 Maximum water holding capacity of undecomposed layer/(t/hm ²)	10.74—31.33	22.40	7.65	34.16
半分解层最大持水量 Maximum water holding capacity of half decomposition layer/(t/hm ²)	13.21—27.71	21.71	4.87	22.41
饱和导水率 Saturated water conductivity/%	0.63—1.42	0.90	0.21	23.36
非毛管蓄水能力 Non-capillary water storage capacity/(t/hm ²)	151.8—324.6	240	57.1	23.77
毛管蓄水能力 Capillary storage capacity/(t/hm ²)	2587.2—3390.3	3051.4	243.5	7.98

2.4.2 评价结果

由表 5 可知, 各指标的权重分布在 0.099—0.143 之间。其中, 林冠层的权重为 11.9%, 枯落物层和土壤层的权重之和为 88.1%。结果表明, 枯落物层和土壤层是林地蓄水保水能力的主要作用层。

由表 6 可知, 各林分类型水源涵养能力整体上表现为云杉白桦混交林 (0.746) > 白桦落叶松混交林 (0.547) > 云杉青杨混交林 (0.504) > 白桦青杨混交林 (0.480) > 白桦纯林 (0.467) > 云杉纯林 (0.244), 可见针阔混交林的水源涵养能力最好, 阔叶混交林与阔叶纯林次之, 针叶纯林水源涵养能力最差, 其中针阔混交林的水源涵养能力得分约为针叶纯林得分得 2.07—3.06 倍, 因此针阔混交林, 特别是云杉白桦混交林和白桦落叶松混交林可作为区域林分结构调控和新林营造的目标林分配置, 并且避免直接营造云杉纯林。

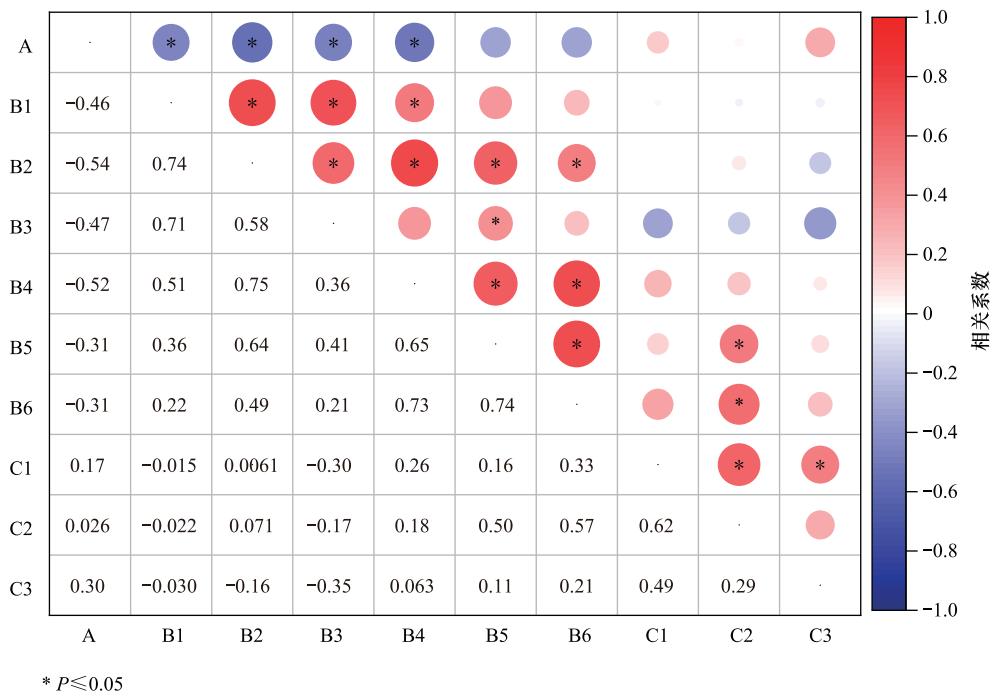


图 6 林分水源涵养能力初选指标相关性检验
Fig.6 Correlation test of primary index of water conservation ability of stand

A:林冠截留率 Canopy interception rate/%;B1: 未分解层厚度 Thickness of undecomposed layer/cm;B2: 半分解层厚度 Half decomposition layer thickness/cm;B3: 未分解层蓄积量 Undecomposed reservoir volume/(t/hm^2);B4: 半分解层蓄积量 Volume of semi-decomposition layer/(t/hm^2);B5: 未分解层最大持水量 Maximum water holding capacity of undecomposed layer/(t/hm^2);B6: 半分解层最大持水量 Maximum water holding capacity of half decomposition layer/(t/hm^2);C1: 饱和导水率 Saturated water conductivity/%;C2: 非毛管蓄水能力 Non-capillary water storage capacity/(t/hm^2);C3: 毛管蓄水能力 Capillary storage capacity/(t/hm^2)

表 5 水源涵养能力评价各指标权重
Table 5 Weight of each index of water conservation capacity evaluation

指标 Index	权重 Weight	指标 Index	权重 Weight
林冠截留率 Canopy interception rate	0.119	半分解层最大持水量 Maximum water holding capacity of half decomposition layer	0.143
未分解层厚度 Thickness of undecomposed layer	0.132	饱和导水率 Saturated water conductivity	0.142
半分解层蓄积量 Volume of semi-decomposition layer	0.132	非毛管蓄水能力 Non-capillary water storage capacity	0.133
未分解层最大持水量 Maximum water holding capacity of undecomposed layer	0.099	毛管蓄水能力 Capillary storage capacity	0.100

表 6 各林地水源涵养能力评价结果
Table 6 Evaluation results of water conservation capacity of each forest land

林分类型 Stand type	PcK	BpS	PcK×BpS	PcK×PcR	BpS×PcR	BpS×LpM
得分 Composite value	0.244±0.039c	0.467±0.078b	0.746±0.033a	0.504±0.079b	0.48±0.059b	0.547±0.074b

3 讨论

3.1 不同林分林冠层水源涵养能力分析

林冠层在森林水文循环中扮演着重要的角色,作为拦蓄降水和涵养水源的首要层次,其主要功能是对降

雨的“数量”和“能量”进行关键的调节,实质上是通过叶片吸附降水来实现的^[10,24]。林冠截留量和截留率在不同林地之间差异显著($P<0.05$),表现为针叶林>阔叶林,混交林优于阔叶纯林。这与张焜、刘芳蕊等的研究结果一致^[15,29]。原因是,一方面,针叶林具有较大的比表面积、毛管张力大,对水分的吸附作用强,阔叶林则与之相反,且混交林的空间利用率相较于纯林更好;另一方面,林冠截留量受到龄组和林分密度的影响,随着林龄的增加,其水源涵养能力也随之变化^[13-14],本文所选取样地的林龄均在 20—40a 之间,白桦纯林等阔叶树种已经进入近熟林和成熟林阶段,而云杉纯林仍处于幼龄林阶段,因此,林冠截留能力也存在一定的差异。随着林分密度的增加,郁闭度增加,总叶面积增加,其林冠截留量也会相应的增加^[20,30],研究区云杉纯林的密度远大于其他林分类型,故其林冠截留量大于其他林分类型。林冠截留率的范围在 19.39%—28.86% 之间,与诸多学者对截留率的研究结果(14.7%—31.8%)一致^[31-33]。

3.2 不同林分与凋落物水文效应关系

枯落物层的截留能力主要受到枯落物储量和持水能力的影响,在森林水文效应和生态平衡中扮演着不可或缺的角色^[34-35]。枯落物层是指覆盖在土壤表面的植被死亡后的凋落物组织,可以分散滞缓地表径流、削弱降水,同时,枯落物结构疏松,可以为土壤动物和微生物提供栖息地,这些动物的进食和挖掘行为一方面可以加速枯落物的分解,另一方面也可以改善土壤水肥条件,增加土壤孔隙度,提升土壤入渗性能^[5,36-37]。本研究结果表明枯落物厚度最大的为白桦纯林,最小的为云杉纯林,最大值是最小值的 1.67 倍。这可能是因为,一方面受到调查时间的限制,生长季的叶片还来不及分解,而白桦冠幅和叶片相对于其他林分类型较大;另一方面受到不同林分类型生态学 and 生物学的影响,不同林分类型枯落物的厚度以及分解速率等均存在一定的差异,导致枯落物不同分解层之间的持水性能不同^[38-39]。

孙拥康、陈晶亮等的研究结果显示,枯落物半分解层的厚度和储量均大于未分解层;而杨良辰得出针叶林未分解层大于半分解层^[26,40],针阔混交林未分解层小于半分解层^[41]。本研究结果与杨良辰等的结果一致,除云杉纯林外,其他林分均表现为未分解层小于半分解层,这可能跟林龄、树种特性、水热条件和地上微环境有关。枯落物层水源涵养能力表现为针阔混交林>阔叶混交林(阔叶林)>针叶纯林,这与孙拥康、侍柳彤等的研究结果一致^[26,39]。这可能是受到凋落物组成、叶片形状和生理生化特性的影响,使得分解周期或速率不同^[40]。

3.3 不同林分与土壤层水文效应关系

土壤水文效应反映了森林涵养水源的能力,其直接影响植被的生长发育及地表径流和土壤水分的入渗,由于不同林地表层凋落物组成、储量、分解速率及地下根系对土壤水分的吸收不同,从而导致土壤理化性质也存在一定的差异^[12,40]。土壤非毛管孔隙度具有透水性能,能够快速容纳降雨并促使径流下渗,其大小与土壤水分入渗呈正相关,孔隙数量多,则渗透性能强^[12]。本研究中,6 种林分类型的非毛管孔隙度和总孔隙度在不同林分类型之间变化趋势一致,整体表现为混交林多优于纯林,最小的为云杉纯林。这可能是因为混交林较纯林土壤结构更为疏松,土壤的通气、透水性好,导致土壤物理性质结构较优^[26,42]。云杉纯林之所以最小,可能是由林地本身自然环境和物种多样性决定的,其乔木物种单一,林下灌木草本丰富度也较小,土壤结构简单土壤非毛管孔隙较少,不利于土壤水分的入渗^[12,21]。

饱和导水率整体上表现为混交林大于纯林,针阔混交林大于阔叶混交林。这与马思文和刘凯等的研究结果相一致^[5,21]。这可能是因为植被与环境之间存在一定的适应性,植物倾向在更好的环境中生存,以便获得更多的养分和水分,长期生长使得林下枯落物含量增多,并且加速枯落物的分解,增加土壤有机质,最终导致土壤饱和导水率增大。

3.4 不同林分类型水源涵养能力综合评价

枯落物层和土壤层占评价指标总权重的 88.1%,与大家普遍所认为枯落物层和土壤层是水源涵养的主体,占总体水源涵养量 85%左右的结果是基本一致的^[10,38]。因此,在林地水源管理中,特别需要保护枯落物层和土壤层,以确保它们的功能得以最大限度地发挥,这对于维护森林生态系统的水平衡和可持续发展具有

重要的意义。

林地水源涵养能力评估结果表明云杉白桦混交林和白桦落叶松混交林的水源涵养能力相对较高,而云杉纯林和白桦纯林水源涵养能力较低,即混交林的水源涵养能力明显大于纯林,且在混交林中,针阔混交林的水源涵养能力高于阔叶混交林。这一结论与诸多学者^[11,22,40]的研究结果一致。云杉纯林整体的水源涵养能力明显低于混交林,甚至远低于白桦纯林。这主要是因为,一方面,云杉的生物学特性使其在幼年阶段喜阴,需要创造一个遮荫的环境,而纯林显然不具备这样的条件;另一方面,研究区的云杉纯林和白桦纯林虽然都为20—40年生,但白桦等阔叶树种已经进入近熟和成熟阶段,而云杉纯林仍处于幼龄林阶段。因此,在营造新林时,要避免直接营造云杉纯林。

4 结论

祁连山东部地区6种典型林分林冠层、枯落物层和土壤层的水源涵养能力都受到林分类型的影响。(1)不同林分类型林冠截留能力表现为针叶林>阔叶林,混交林>阔叶纯林;(2)枯落物的厚度和储量变化趋势一致,云杉纯林(针叶纯林)表现为未分解层>半分解层,其他林分类型(针阔混交林、阔叶混交林和阔叶纯林)均表现为未分解层小于半分解层。(3)土壤孔隙度和饱和导水率整体上表现为混交林大于纯林,且针阔混交林更优。(4)不同作用层次中,枯落物层和土壤层的水源涵养能力占林地总水源涵养能力的88.1%。(5)最后,通过对6种典型林分水源涵养能力的综合评价结果可以得出云杉白桦混交林(0.746)>白桦落叶松混交林(0.547)>云杉青杨混交林(0.504)>白桦青杨混交林(0.480)>白桦纯林(0.467)>云杉纯林(0.244)。综上,针阔混交林可以作为区域林分结构调整和营造新林的目标林分,特别优选云杉白桦混交林和白桦落叶松混交林,在营造新林的时候,避免直接营造云杉纯林。

参考文献(References):

- [1] Liu Y, Shi W, Tao F, 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.
- [2] Zhang Y, Zhang B, Ma B, Yao R, Wang L. Evaluation of the water conservation capacity of the Weihe River Basin based on the Integrated Valuation of Ecosystem Services and Tradeoffs model. *Ecohydrology*. 2022 Dec;15(8):e2465.
- [3] 刘世荣,代力民,温远光,王晖. 面向生态系统服务的森林生态系统经营:现状、挑战与展望. *生态学报*, 2015, 35(1): 1-9.
- [4] 周佳雯,高吉喜,高志球,杨伟超. 森林生态系统水源涵养服务功能解析. *生态学报*, 2018, 38(5): 1679-1686.
- [5] 刘凯,贺康宁,王先棒. 青海高寒区不同密度白桦林枯落物水文效应. *北京林业大学学报*, 2018, 40(1): 89-97.
- [6] Andreassen, Mie, Jesper R. Christiansen, Torben O. Sonnenborg, Simon Stisen, and Majken C. Looms. "Seasonal dynamics of canopy interception loss within a deciduous and a coniferous forest." *Hydrological Processes* 37.4 (2023): e14828.
- [7] 王艳萍,王力,卫三平. Gash模型在黄土区人工刺槐林冠降雨截留研究中的应用. *生态学报*, 2012, 32(17): 5445-5453.
- [8] Zhang W J, Zhu X A, Xiong X, Wu T, Zhou S, Lie Z Y, Jiang X J, Liu J X. Changes in soil infiltration and water flow paths: insights from subtropical forest succession sequence. *CATENA*, 2023, 221: 106748.
- [9] 王涛,蒙仲举,党晓宏,李浩年,付东升,赵飞燕,杨圃畅. 库布齐沙漠人工防护林林下枯落物及土壤水文效应研究. *生态环境学报*, 2021, 30(4): 700-707.
- [10] Liu Z Q, Yu X X, Jia G D. Water uptake by coniferous and broad-leaved forest in a rocky mountainous area of Northern China. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2019, 265: 381-389.
- [11] 王旭,贾国栋,岳永杰,孟君,牛云明. 科尔沁沙地南缘典型林分枯落物层与土壤层水源涵养能力研究. *干旱区资源与环境*, 2023, 37(9): 144-153.
- [12] 白云星,周运超,张薰元,杜姣姣. 马尾松针阔混交人工林凋落物和土壤水源涵养能力. *林业科学*, 2021, 57(11): 24-36.
- [13] 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.
- [14] 杨家慧,谭伟,卯光宪,冯艳. 黔中不同龄组柳杉人工林枯落物水源涵养能力综合评价. *水土保持学报*, 2020, 34(2): 296-301, 308.
- [15] 张焜,张洪江,程金花,张君玉,孙龙,马西军. 重庆四面山5种森林类型林冠截留影响因素浅析. *西北农林科技大学学报:自然科学版*, 2011, 39(11): 173-179.

- [16] 王先棒, 贺康宁, 董喆, 刘凯. 北川河流域典型林型水源涵养能力评价. 中国水土保持科学, 2017, 15(5): 94-102.
- [17] 张佳楠, 张建军, 张海博, 孙若修, 张守红, 杨云斌. 晋西黄土区典型林分水源涵养能力评价. 北京林业大学学报, 2019, 41(8): 105-114.
- [18] 王作泉, 贾洪文, 麻鑫垚, 李远航, 林莎, 张静, 贺康宁. 青海东部典型人工水源涵养林稳定性比较. 中国水土保持科学: 中英文, 2023, 21(2): 47-56.
- [19] 丁玲玲, 祁彪, 尚占环, 龙瑞军, 周启星. 东祁连山不同高寒草地型土壤微生物数量分布特征研究. 农业环境科学学报, 2007, 26(6): 2104-2111.
- [20] 程唱, 贺康宁, 俞国峰, 柴世秀. 干旱半干旱区不同林型人工林水源涵养能力比较研究. 生态学报, 2021, 41(5): 1979-1990.
- [21] 马思文, 张洪江, 程金花, 李明峰, 王平. 三峡库区典型城郊防护林土壤饱和导水率特征研究. 南京林业大学学报: 自然科学版, 2018, 42(5): 99-106.
- [22] 张静, 贾洪文, 李远航, 左亚凡, 林莎, 王帅军, 王作泉, 贺康宁. 青海大通县典型林分的枯落物和土壤蓄水能力评价. 中国水土保持科学: 中英文, 2022, 20(2): 106-114.
- [23] Wang S, Zhang B, Wang S, Xie G D. Dynamic changes in water conservation in the Beijing-Tianjin Sandstorm Source Control Project Area: a case study of Xilin Gol League in China. Journal of Cleaner Production, 2021, 293: 126054.
- [24] 时忠杰, 王彦辉, 徐丽宏, 熊伟, 于澎涛, 郭浩. 六盘山华山松 (*Pinus armandii*) 林降雨再分配及其空间变异特征. 生态学报, 2009, 29(1): 76-85.
- [25] 段汝航, 赵仲辉, 项文化. 湖南会同杉木人工林林冠截留特征及模拟. 水土保持学报, 2017, 31(4): 320-324, 344.
- [26] 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. 北京林业大学学报, 2021, 43(8): 60-69.
- [27] 张昌顺, 谢高地, 刘春兰, 范娜, 王小昆. 基于水源涵养参照系的中国生态系统水源涵养功能优劣评估. 生态学报, 2022, 42(22): 9250-9260.
- [28] Cui Y S, Pan C Z. Hydrological responses to litter density on runoff-infiltration patterns and water conservation in *Pinus tabulaeformis* plantation. Journal of Hydrology, 2023, 619: 129293.
- [29] 刘芳蕊. 基于水源涵养功能的嫩江源头森林植被优化配置研究[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2015.
- [30] 丁霞, 程昌锦, 漆良华, 张建, 雷刚, 刘学全. 丹江口库区湖北水源区不同密度马尾松人工林水源涵养能力. 生态学报, 2019, 38(8): 2291-2301.
- [31] Zhang G, Zeng G M, Jiang Y M, Huang G H, Li J B, Yao J M, Tan W, Xiang R, Zhang X L. Modelling and measurement of two-layer-canopy interception losses in a subtropical evergreen forest of central-south China. Hydrology and Earth System Sciences, 2006, 10(1): 65-77.
- [32] 方书敏, 赵传燕, 荐圣淇, 余凯. 陇中黄土高原油松人工林林冠截留特征及模拟. 应用生态学报, 2013, 24(6): 1509-1516.
- [33] 陈书军, 陈存根, 曹田健, 赵晓婷, 郝红科, 庞军柱, 张硕新. 降雨量级和强度对秦岭油松林林冠截留的影响. 应用基础与工程科学学报, 2015, 23(1): 41-55.
- [34] 程金花, 张洪江, 史玉虎, 潘磊, 祁生林, 程云, 何凡. 三峡库区几种林下枯落物的水文作用. 北京林业大学学报, 2003, 25(2): 8-13.
- [35] 侯贵荣, 毕华兴, 魏曦, 孔凌霄, 周巧稚, 张渲东. 黄土残塬沟壑区刺槐林枯落物水源涵养功能综合评价. 水土保持学报, 2019, 33(2): 251-257.
- [36] Gessner M O, Swan C M, Dang C K, McKie B G, Bardgett R D, Wall D H, Hättenschwiler S. Diversity meets decomposition. Trends in Ecology & Evolution, 2010, 25(6): 372-380.
- [37] 李强, 周道玮, 陈笑莹. 地上枯落物的累积、分解及其在陆地生态系统中的作用. 生态学报, 2014, 34(14): 3807-3819.
- [38] 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. 水土保持学报, 2019, 33(2): 264-271.
- [39] 侍柳彤, 史常青, 杜晨曦, 杨建英. 小五台山地区主要林分枯落物分布特征及水源涵养能力. 水土保持学报, 2022, 36(5): 195-203.
- [40] 陈晶亮, 杨慧, 刘超, 王博, 黄磊. 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. 生态学报, 2023, 43(19): 7987-7997.
- [41] 杨良辰, 张春茹. 沿坝地区 3 种典型林分类型枯落物层与土壤层水源涵养能力综合评价. 水土保持研究, 2018, 25(6): 177-182.
- [42] 陈乾, 刘凯, 王希贤, 黄霞, 汪国彬, 荣俊冬, 何天友, 陈礼光, 郑郁善. 福建柏混交林主要土壤理化性质与土壤含水量的关联研究. 福建农林大学学报: 自然科学版, 2021, 50(6): 771-780.