

DOI: 10.20103/j.stxb.202304020654

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.
Chen J L, Yang H, Liu C, Wang B, Huang L. Comprehensive evaluation of the water conservation capacity of litter and soil layers in three typical forest types in the Luoshan Nature Reserve, Ningxia. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(19): 7987-7997.

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

陈晶亮^{1,2}, 杨 慧³, 刘 超³, 王 博^{1,2}, 黄 磊^{1,*}

1 中国科学院西北生态环境资源研究院沙坡头沙漠研究试验站, 兰州 730000

2 中国科学院大学, 北京 100049

3 宁夏罗山国家级自然保护区管理局, 吴忠 751999

摘要: 森林凋落物层和土壤层是森林生态水文效应中的主要贡献层, 对森林生态系统水土保持功能和水源涵养能力有重要影响。对比宁夏罗山自然保护区 3 种典型林分类型凋落物和土壤层水文效应的变化规律和水源涵养能力大小, 为该地区的森林生态水文、水土保持和森林管理提供科学依据。以该自然保护区青海云杉纯林、油松纯林和青海云杉油松混交林为研究对象, 运用称量、室内浸泡、环刀法和回归分析法对凋落物和土壤层的水文效应进行测定和拟合, 并使用熵权法对二者的水源涵养能力进行评估。结果表明: (1) 青海云杉油松混交林凋落物的总厚度和总储量显著高于青海云杉纯林和油松纯林 ($P < 0.05$), 3 种林分类型的半分解层的厚度和储量高于未分解层。 (2) 凋落物层最大持水量范围为 63.29—95.08 t/hm², 最大持水率范围为 335.97%—353.85%, 有效拦蓄量范围为 34.09—63.92 t/hm², 三者均为青海云杉油松混交林 > 云杉纯林 > 油松纯林。 (3) 3 种林分类型的凋落物持水量 (Q) 与浸泡时间 (t) 呈对数函数关系, 吸水速率 (V) 与浸泡时间 (t) 呈幂函数关系。 (4) 从 3 种林分类型的土壤物理性质和持水特性得出, 3 种林分类型的土壤层水文效应的等级排序为云杉油松混交林 > 油松纯林 > 青海云杉纯林。 (5) 凋落物层和土壤层的水源涵养能力大小为青海云杉油松混交林 (0.43) > 油松林 (0.3) > 青海云杉林 (0.27)。综合来看, 青海云杉油松混交林的凋落物层和土壤层的水源涵养能力最优, 其次是纯林, 说明混交林在水土保持和水源涵养方面比纯林更具优势。

关键词: 森林生态水文; 凋落物层; 土壤层; 水源涵养

Comprehensive evaluation of the water conservation capacity of litter and soil layers in three typical forest types in the Luoshan Nature Reserve, Ningxia

CHEN Jingliang^{1,2}, YANG Hui³, LIU Chao³, WANG Bo^{1,2}, HUANG Lei^{1,*}

1 Shapotou Desert Research and Experiment Station, Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China

2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

3 Ningxia Luoshan National Nature Reserve Management Bureau, Wuzhong 751999, China

Abstract: The litter layer and soil layer are the main contributing layers to the forest eco-hydrological effects, significantly influencing the water and soil conservation functions and water storage capacity of forest ecosystems. This study compares the variations and water conservation capacities of litter and soil layers among three typical forest stand types in the Luoshan Nature Reserve, Ningxia, China, providing a scientific basis for forest eco-hydrology, soil and water conservation, and forest management in the region. The study focuses on pure forests of Qinghai spruce, pure forests of Chinese pine, and the

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41977420, 41671076); 宁夏回族自治区重点研发计划项目 (2021BEG02009) 资助

收稿日期: 2023-04-02; **采用日期:** 2023-07-24

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: mathecology@163.com

mixed forests of Qinghai spruce and Chinese pine. Measurement, laboratory soaking, ring knife method, and regression analysis are employed to determine and model the hydrological effects of litter and soil layers. The entropy weight method is used to assess their water storage capacities. The results indicate that: (1) the total thickness and total storage of litter in the mixed forest of Qinghai spruce and Chinese pine are significantly higher than those in the pure forests of Qinghai spruce and Chinese pine ($P < 0.05$), and the thickness and storage of the semi-decomposed layer are higher than those of the undecomposed layer in all three forest stand types. (2) the maximum water-holding capacity of the litter layer ranges from 63.29 to 95.08 t/hm², with a maximum water-holding rate ranging from 335.97% to 353.85%, and the effective water retention ranges from 34.09 to 63.92 t/hm². In all three forest stand types, these values follow the order of mixed forest of Qinghai spruce and Chinese pine > pure Qinghai spruce forest > pure Chinese pine forest. (3) the litter water-holding capacity (Q) of the three forest stand types exhibits a logarithmic function relationship with soaking time (t), while the water absorption rate (V) shows a power function relationship with soaking time (t). (4) the ranking of hydrological effects of soil layers among the three forest types, based on their physical properties and water holding characteristics, is spruce and pine mixed forest > pure pine forest > pure spruce forest. The water conservation capacities of the litter layer and soil layer are in the order of spruce and pine mixed forest (0.43) > pine forest (0.3) > spruce forest (0.27). Overall, the water conservation capacity of the litter layer and soil layer is the best in the spruce and pine mixed forest, followed by the pure forests, indicating that the mixed forests have greater advantages in soil and water conservation than pure forests.

Key Words: forest hydrology; litter layer; soil layer; water conservation

森林生态系统是陆地生态系统的重要组成部分之一,具有涵养水源、改善水质、防风固沙、净化空气、调节气候和保护生物多样性等多种生态系统服务功能^[1];但是,近年来由于全球极端天气和气候事件的频发以及对森林生态系统功能缺乏了解和林业经营管理上的失误,导致森林生态系统遭受巨大破坏,对森林生态系统服务功能造成严重损害^[2-3]。所以森林生态系统水文调节和水源涵养功能的研究成为生态学和文学中研究的热点。

森林生态水文过程一般体现在森林冠层、凋落物层和土壤层对降水的截持、吸收、入渗、蓄水以及蒸散发等方面^[4-6]。其中最主要的是凋落物层和土壤层,它们是水源涵养和水土保持的主体。有研究表明二者蓄水量达到森林总蓄水量的 85%,在森林生态水文方面发挥着重要作用^[7]。凋落物层是森林生态水文效应的第二功能层,具有疏松多孔的结构,可以有效的截持降雨、拦蓄地表径流,进而防止土壤冲蚀和土壤里面水分的蒸发,同时凋落物分解会形成腐殖质等返回到土壤中,改良土壤,也是物质循环和能流的一种方式^[8-10];而土壤层作为第三活动层,调节着大气、植被与土壤三者之间的关系,能够对水分进行入渗,是森林生态系统养分、持水、蓄水的重要载体,可以跟凋落物、植物根系等结合实现地表水与地下水的交换^[9-12]。因此,研究凋落物层和土壤层的生态水文效应和水源涵养能力可进一步加深对森林生态水文的认识。

宁夏罗山国家级自然保护区是宁夏“三大”天然次生林区之一,处于鄂尔多斯高原西部与黄河高原北部的干旱半干旱地带,被誉为“荒漠翡翠”、“瀚海明珠”^[13]。罗山自然保护区是宁夏中部干旱带重要的绿色生态屏障和水源涵养区,在宁夏经济社会发展和生态安全方面具有十分重要的地位。所以,开展宁夏罗山典型植被水源涵养和保持水土等功能的研究具有重要意义。以森林凋落物和土壤层水文效应的视角来反映森林生态系统水源涵养能力的研究大部分集中在热带、亚热带地区,而在干旱半干旱地区相对较少,尤其是宁夏罗山。有学者对该地区不同林分保育土壤和水源涵养功能以及水文调节方面进行了研究,但对典型林分类型凋落物层和土壤层的水文效应和水源涵养能力的综合评估相对缺乏。因此,本文利用熵权法将宁夏罗山 3 种典型林分类型凋落物层和土壤层水源涵养能力进行量化,以便于对该地区典型林分类型的凋落物层和土壤层水源涵养能力更加直观的进行评价和比较,从而进一步了解该地区森林生态水文的规律和机制以及为该地区的植被恢复和森林生态水文效益的评价提供科学的理论指导^[5,14]。

1 研究区概况和研究方法

1.1 研究区概况

研究区位于宁夏罗山国家级自然保护区(北纬 37°11′—37°25′,东经 106°04′—106°24′),南北长 36km,东西宽 18km,区域海拔 1560—2624.5m,总面积 33710hm²。地处宁夏中部干旱区,其位于典型草原与荒漠生态过渡带上,属于中温带干旱大陆性气候,年平均日照时数为 2881.5h,气温年、日较差大,年降水量少而集中,平均为 262.5mm,年平均相对湿度为 49%。植被类型主要以森林、灌丛、草甸和草原为主,主要森林类型有青海云杉(*Picea crassifolia*)、油松(*Pinus tabulaeformis*)、山杨(*Populus davidiana*)等,林下植被有虎榛子(*Ostryopsis davidiana*)、榆树(*Ulmus pumila*)、藜(*Chenopodium album*)、升麻(*Actaea cimicifuga*)、水栒子(*Cotoneaster multiflorus*)、委陵菜(*Potentilla chinensis*)、蒙古扁桃(*Prunus mongolica*)、斜茎黄芪(*Astragalus laxmannii*)、沙枣(*Elaeagnus angustifolia*)等,土壤主要为灰褐土和灰钙土^[15]。

1.2 研究方法

1.2.1 样地选择与采样方法

2022 年 7 月,在宁夏罗山国家级自然保护区分别选取坡形、坡度、坡向等地形因子基本一致的青海云杉纯林、油松纯林和青海云杉油松混交林。采用样地调查法,在每种林分中设置具有代表性的样地 3 个,样地面积为 20m×20m,调查三种林分类型林冠郁闭度和树木生长基本指标,并记录坡向、海拔等立地特征(表 1)。在各林分样地内随机选取 3 个 30cm×30cm 的小样方,每个样方里面的凋落物按“未分解层”和“半分解层”分别进行收集,并现场测定各层凋落物的厚度和鲜重,单独装袋带回实验室 85℃ 下烘干备用。凋落物采集后,在相同位置运用环刀法对林下植被土壤进行取样,分别在 0—10、10—20、20—40cm 土层深度取土,每层 3 次重复,进而测定土壤物理性质和持水性能(本研究采用 0—40cm 三层平均值进行统计分析)。

表 1 三种不同林分类型的样地基本概况

Table 1 Basic overview of plots of three different forest types

林分类型 Stand type	经度/E Longitude	纬度/N Latitude	海拔/m Altitude	土壤类型 Soil type	坡向 Slope degree	密度 Density/ (株/hm ²)	树高 Tree height/m	枝下高 Under branch height/m	胸径 Diameter at breast height/cm	郁闭度 Canopy density
青海云杉 <i>Picea crassifolia</i>	106°28′	37°30′	2531.5	灰褐土	阴	2000	13.61	4.46	21.68	0.63
油松 <i>Pinus tabulaeformis</i>	106°28′	37°28′	2331.5	灰褐土	阴	2800	10.40	1.86	24.17	0.65
云杉+油松 <i>Picea crassifolia</i> + <i>Pinus tabulaeformis</i>	106°28′	37°28′	2378.3	灰褐土	阴	1500	16.63	6.49	22.25	0.65

1.2.2 凋落物储量调查

凋落物储量计算公式如下:

$$M = \frac{10}{n} \sum_{i=1}^n \frac{m}{s} \quad [16]$$

$$R_0 = \frac{G_{\text{鲜}} - G_{\text{干}}}{G_{\text{干}}} \times 100\% \quad [5]$$

式中, M 代表储量(kg/hm²), n 表示每个样地里面的小样方数, m 表示凋落物烘干后的质量(g), s 为小样方面积(m²),10 为单位转换系数, R_0 表示凋落物自然含水率, $G_{\text{鲜}}$ 、 $G_{\text{干}}$ 表示凋落物鲜重、干重(g)。

1.2.3 凋落物持水性能测定

采用室内浸泡法^[17-18],把烘干后的凋落物装入 100 目的尼龙网袋,然后浸泡在清水中,分别浸泡 0.25h、0.5h、1h、2h、3h、4h、6h、8h、12h 和 24h 后取出,静置至不滴水时用精度为 0.01g 的电子天平称湿重,每个植被类型设为 3 次重复。从而计算出凋落物的最大持水量、最大持水率以及有效拦蓄量和持水量、吸水率,计算

如下:

$$R_m = \frac{G_{24} - G_{\text{干}}}{G_{\text{干}}} \times 100\% \quad [5]$$

$$W_0 = (0.85 R_m - R_0) M \quad [19]$$

$$Q = G_{\text{浸}} - G_{\text{干}} \quad [17]$$

$$V = Q/t \quad [4]$$

式中, R_m 为凋落物的最大持水率(%), G_{24} 、 $G_{\text{浸}}$ 为浸泡 24h 后的重量和浸泡对应时间的重量(g), W_0 、 Q 为凋落物有效拦蓄量和持水量(t/hm^2), V 为凋落物吸水速率($\text{t}/\text{hm}^2 \cdot \text{h}^{-1}$), t 为浸泡时间(h)。

一般情况下, 当凋落物浸泡 24h 后持水量会达到饱和, 这时候凋落物的饱和持水量视为最大持水量, 此时对应的持水率即最大持水率^[17,20]。

1.2.4 土壤层物理性质和持水性能测定

土壤层物理性质和持水性能测定采用环刀法, 具体测定及计算方法参照中华人民共和国林业行业标准 LY/T 1215—1999 进行^[4]。

1.2.5 水源涵养能力综合评估

为评估 3 种林分类型凋落物和土壤层的水文效应和水源涵养能力, 利用熵权法对林分各指标进行量化, 计算公式如下:

$$P_{ij} = \frac{y_{ij}}{\sum_{i=1}^m y_{ij}} \quad [21]$$

$$H_j = -k \sum_{i=1}^m p_{ij} \ln p_{ij} \quad k = 1/\ln(N) \quad [21]$$

$$g_j = 1 - H_j \quad [14]$$

$$w_j = \frac{g_j}{\sum_{j=1}^n g_j} \quad [14]$$

式中, i 为林分类型数, j 为评价指标数, P_{ij} 代表贡献度, k 为常数, H_j 代表熵值, g_j 为差异系数, w_j 为权重^[14]。

1.3 数据分析处理

在 Excel 2016 中进行数据整理, 统计分析在 SPSS 26.0 中进行, 绘图在 GraphPad Prism 9 (GraphPad Software Inc., San Diego, CA, USA) 中进行, 并用 Duncan's multiple range tests 法进行差异显著性检验 ($P < 0.05$)。

2 结果与分析

2.1 不同林分类型凋落物厚度与储量

通过对宁夏罗山不同森林类型样地凋落物层的调查和分析, 3 种林分类型凋落物总厚度变动范围为 4.53—7.47cm, 青海云杉最小, 云杉油松混交林最大; 总储量变动范围为 37.33—51.08 t/hm^2 , 由大到小排序为云杉油松混交林>青海云杉>油松(表 2)。方差分析表明: 3 种林分类型凋落物未分解层厚度和总厚度差异不显著, 而 3 种林分类型凋落物半分解层厚度变化差异显著 ($P < 0.05$); 3 种林分类型凋落物未分解层储量差异不显著, 但半分解层储量和总储量则表现为云杉油松混交林显著高于云杉纯林和油松纯林 ($P < 0.05$)。从 3 种林分类型凋落物厚度和储量及占比的分层变化看, 3 种林分类型的半分解层均高于未分解层, 其中云杉油松混交林的半分解层远高于未分解层。

2.2 不同林分类型凋落物层水文效应

2.2.1 不同林分类型凋落物层最大持水量

最大持水量和最大持水率是凋落物水文效应的重要指标, 可以表示凋落物的持水能力。3 种林分类型

中,云杉油松混交林未分解层和半分解层以及总的最大持水量均最大,且总的最大持水量显著高于青海云杉纯林和油松纯林($P<0.05$),依次为 $95.08\text{t}/\text{hm}^2$ 、 $67.76\text{t}/\text{hm}^2$ 、 $63.29\text{t}/\text{hm}^2$;3 种林分类型的最大持水率的范围为 335.97% — 353.85% (表 3),虽然三者在未分解层、半分解层和总的最大持水率中差异不明显,但在总的最大持水率中依次为云杉油松混交林>青海云杉纯林>油松纯林,跟最大持水量的排序一致。

表 2 三种林分类型枯落物厚度与储量

Table 2 Litter thickness and reserves in three forest types

林分类型 Stand type	凋落物层厚度 Litter Layer thickness/cm			凋落物层储量 Litter Layer volume/(t/hm^2)				
	未分解 Undecomposed	半分解 Semi-decomposed	总厚度 Total thickness	未分解 Undecomposed	比例 Proportion/%	半分解 Semi-decomposed	比例 Proportion/%	总储量 Total volume
青海云杉 <i>Picea crassifolia</i>	$1.53\pm 0.68\text{a}$	$3.00\pm 1.00\text{b}$	$4.53\pm 1.66\text{a}$	$18.73\pm 3.6\text{a}$	46.60	$21.46\pm 2.2\text{b}$	53.40	$40.19\pm 1.52\text{b}$
油松 <i>Pinus tabuliformis</i>	$1.83\pm 0.51\text{a}$	$3.27\pm 0.59\text{b}$	$5.10\pm 0.10\text{a}$	$14.17\pm 1.71\text{a}$	37.96	$23.16\pm 2.1\text{b}$	62.04	$37.33\pm 2.65\text{b}$
云杉+油松 <i>Picea crassifolia</i> + <i>Pinus tabuliformis</i>	$1.33\pm 0.58\text{a}$	$6.13\pm 2.17\text{a}$	$7.47\pm 1.85\text{a}$	$19.03\pm 5.49\text{a}$	37.26	$32.05\pm 3.79\text{a}$	62.74	$51.08\pm 7.85\text{a}$

表 3 三种林分类型枯落物最大持水量和最大持水率

Table 3 Maximum water holding capacity and maximum water holding rate of litter for three forest types

林分类型 Stand type	最大持水量/(t/hm^2) Max amount of water holding capacity			最大持水率/% Max rate of water holding capacity		
	未分解层 Undecomposed layer	半分解层 Semi-decomposed layer	总和 Total	未分解层 Undecomposed layer	半分解层 Semi-decomposed layer	总和 Total
青海云杉 <i>Picea crassifolia</i>	$27.29\pm 4.77\text{a}$	$40.47\pm 4.72\text{a}$	$67.76\pm 5.06\text{ab}$	$147.65\pm 4.79\text{a}$	$191.59\pm 28.70\text{a}$	$339.25\pm 24.33\text{a}$
油松 <i>Pinus tabuliformis</i>	$21.25\pm 0.36\text{a}$	$42.04\pm 4.54\text{a}$	$63.29\pm 4.77\text{b}$	$152.73\pm 15.19\text{a}$	$183.24\pm 8.10\text{a}$	$335.97\pm 8.23\text{a}$
云杉+油松 <i>Picea crassifolia</i> + <i>Pinus tabuliformis</i>	$32.83\pm 11.24\text{a}$	$62.25\pm 28.87\text{a}$	$95.08\pm 23.81\text{a}$	$192.81\pm 97.49\text{a}$	$161.04\pm 23.24\text{a}$	$353.85\pm 100.71\text{a}$

2.2.2 不同林分类型凋落物持水量动态变化

3 种林分类型凋落物持水量随浸泡时间呈倒“J”型曲线变化特征。整体来看,在浸泡 0—1 小时内凋落物持水量迅速增加,1—8 小时内凋落物持水量增长速度逐渐减缓,12h 后凋落物持水量基本达到饱和状态。从整体凋落物分层持水动态变化看,不同林分凋落物半分解层持水量表现为青海云杉油松混交林>油松纯林>青海云杉纯林(图 1);未分解层持水量则表现为青海云杉油松混交林>青海云杉纯林>油松纯林。在同一林分类型下,凋落物半分解层持水量均高于未分解层。

对 0.25—24h 之间 3 种林分类型凋落物持水量与浸泡时间进行回归分析,得出凋落物持水量与浸泡时间呈对数函数回归关系(表 4),且 R^2 都在 0.9 以上。表达式如下:

表 4 三种林分类型凋落物的持水量与浸泡时间的回归方程

Table 4 Regression equations for water holding capacity and soaking time of litter for three stand types

森林类型 Stand type	未分解层 Undecomposed layer		半分解层 Semi-decomposed layer	
	回归方程 Regression equation	R^2	回归方程 Regression equation	R^2
青海云杉 <i>Picea crassifolia</i>	$y = 2.4225\ln(x) + 19.5$	0.901 ***	$y = 1.7346\ln(x) + 35.016$	0.939 ***
油松 <i>Pinus tabuliformis</i>	$y = 2.1193\ln(x) + 14.042$	0.956 ***	$y = 1.9727\ln(x) + 35.826$	0.923 ***
云杉+油松 <i>Picea crassifolia</i> + <i>Pinus tabuliformis</i>	$y = 3.8115\ln(x) + 21.336$	0.982 ***	$y = 7.8268\ln(x) + 38.211$	0.927 ***

*** 代表极其显著相关($P<0.001$)

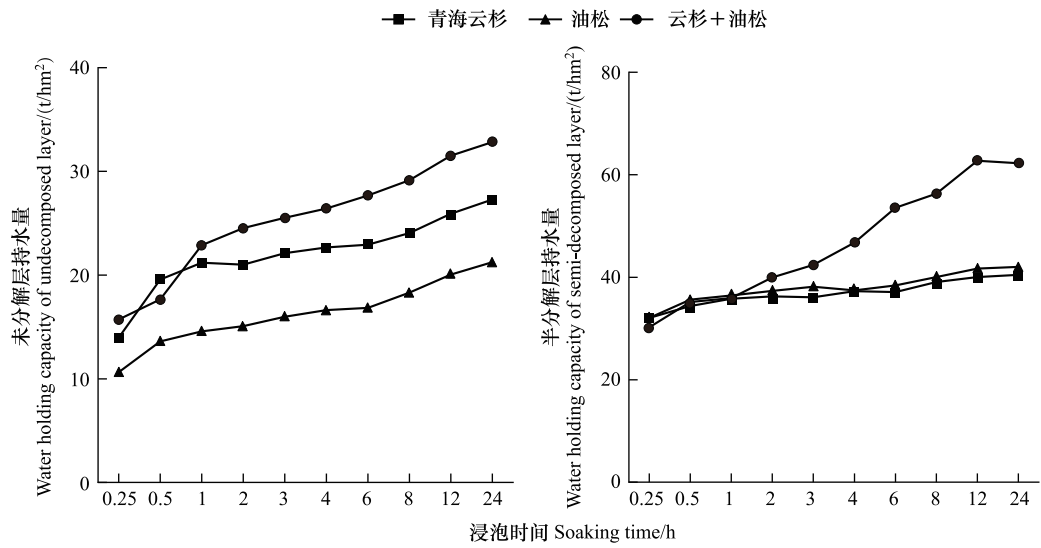


图1 三种林分类型凋落物持水量随浸水时间的变化

Fig.1 Changes of litter water holding capacity with immersion time of three forest types

$$Q = a \ln t + b$$

式中, Q 为凋落物持水量 (t/hm^2); t 为浸泡时间 (h); a 为系数; b 为常数项。

2.2.3 不同林分类型凋落物吸水速率动态变化

3 种林分类型凋落物吸水速率随浸泡时间呈倒“L”型曲线变化特征。整体来看,在浸泡 0.25h 后,凋落物吸水速率达到最大值,在 0.25—2 小时凋落物吸水速率快速下降,6h 后凋落物吸水速率逐渐下降直到停止。从整体凋落物分层吸水速率动态变化看,不同林分凋落物未分解层吸水速率表现为云杉油松混交林>青海云杉纯林>油松纯林(图 2);半分解层吸水速率则表现为此外云杉油松混交林>油松纯林>青海云杉纯林。在同一林分类型下,凋落物半分解层吸水速率均高于未分解层。

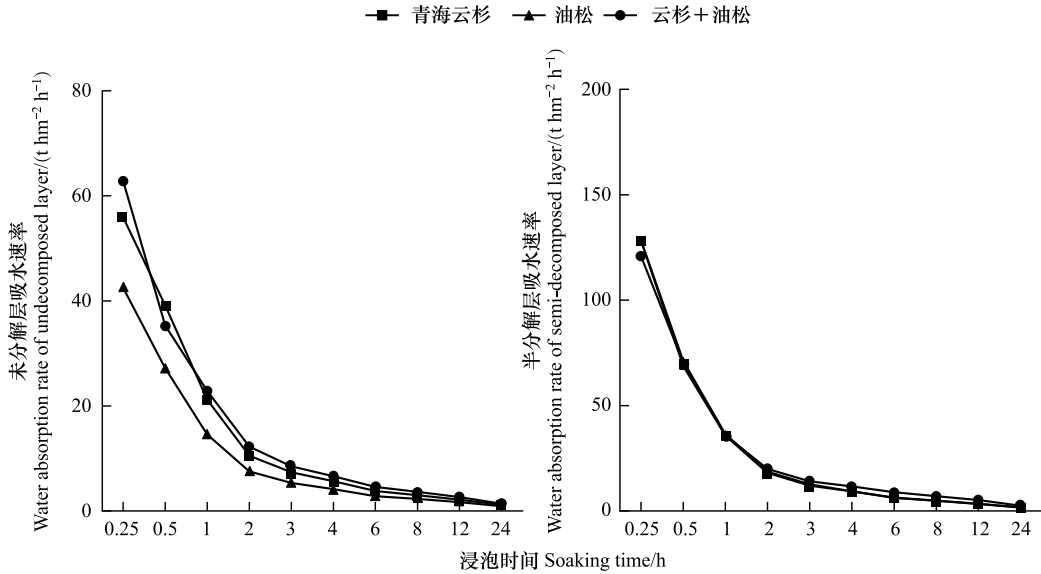


图2 三种林分类型凋落物吸水速率随浸水时间的变化

Fig.2 Changes of water absorption rate with immersion time of three forest types

对 0.25—24h 之间 3 种林分类型凋落物吸水速率与浸泡时间进行回归分析,得出凋落物吸水速率与浸泡时间呈幂函数回归关系(表 5),且 R^2 都在 0.9 以上。表达式如下:

$$V = Kt^n$$

式中, V 为凋落物吸水速率($\text{t hm}^{-2} \text{ h}^{-1}$); t 为浸泡时间(h); k 为凋落物吸水性能系数、 n 为指数。

表 5 三种林分类型凋落物的吸水速率与浸泡时间的回归方程

Table 5 Regression equations for water absorption rate and soaking time of litter for three forest types

森林类型 Stand type	未分解层 Undecomposed layer		半分解层 Semi-decomposed layer	
	回归方程 Regression equation	R^2	回归方程 Regression equation	R^2
青海云杉 <i>Picea crassifolia</i>	$y = 19.19x^{-0.882}$	0.979 ***	$y = 34.96x^{-0.952}$	0.999 ***
油松 <i>Pinus tabulaeformis</i>	$y = 13.86x^{-0.864}$	0.993 ***	$y = 35.753x^{-0.947}$	0.998 ***
云杉+油松 <i>Picea crassifolia</i> + <i>Pinus tabulaeformis</i>	$y = 20.86x^{-0.838}$	0.998 ***	$y = 37.585x^{-0.826}$	0.998 ***

2.2.4 不同林分类型凋落物有效拦蓄量

有效拦蓄量在未分解层和半分解层中,均是青海云杉油松混交林>青海云杉>油松,分别为 30.14t/hm^2 、 15.25t/hm^2 、 14.60t/hm^2 和 33.78t/hm^2 、 19.90t/hm^2 、 19.49t/hm^2 , 相当于拦蓄 3.01mm、1.53mm、1.46mm 和 3.38mm、1.99mm、1.95mm 的降雨(表 6)。

表 6 不同林分类型枯落物层有效拦蓄能力

Table 6 Effective holding capacity of litter layers in different forest types

层次 Layer	林分类型 Stand type	凋落物储量 Litter volume/ (t/hm^2)	最大持水率 Max rate of water holding capacity/%	最大持水量 Max amount of water holding capacity/ (t/hm^2)	自然含水率 Natural moisture content/%	有效拦蓄量 Effective holding capacity/ (t/hm^2)	有效持水深 Effective water holding depth/mm
未分解层 Undecomposed layer	青海云杉 <i>Picea crassifolia</i>	18.73±3.6a	147.65±4.79a	27.29±4.77a	44.04±7.39a	15.25	1.53
	油松 <i>Pinus tabulaeformis</i>	14.17±1.71a	152.73±15.19a	21.25±0.36a	26.79±7.78b	14.60	1.46
	云杉+油松 <i>Picea crassifolia</i> + <i>Pinus tabulaeformis</i>	19.03±5.49a	192.81±97.49a	32.83±11.24a	5.44±3.30c	30.14	3.01
半分解层 Semi-decomposed layer	青海云杉 <i>Picea crassifolia</i>	21.46±2.2b	191.59±28.70a	40.47±4.72a	70.12±8.12a	19.90	1.99
	油松 <i>Pinus tabulaeformis</i>	23.16±2.1b	183.24±8.10a	42.04±4.54a	71.62±11.51a	19.49	1.95
	云杉+油松 <i>Picea crassifolia</i> + <i>Pinus tabulaeformis</i>	32.05±3.79a	161.04±23.24a	62.25±28.87a	31.50±9.62b	33.78	3.38

2.3 不同林分类型凋土壤层水文效应

3 种林分类型土壤容重云杉油松混交林显著低于青海云杉纯林($P<0.05$),其大小排序为青海云杉纯林>油松纯林>云杉油松混交林;3 种林分类型总孔隙度云杉油松混交林显著大于油松纯林和青海云杉纯林($P<0.05$),依次为云杉油松混交林(91.68%)>油松纯林(82.53%)>青海云杉纯林(73.49%);3 种林分类型毛管孔隙度云杉油松混交林显著大于青海云杉纯林($P<0.05$),依次为云杉油松混交林 81.13%,油松纯林 71.36%,青海云杉纯林 57.11%;土壤持水的能力来看,云杉油松混交林显著大于油松纯林和青海云杉纯林($P<0.05$)(表 7)。

2.4 水源涵养能力的综合评估

2.4.1 不同林分类型评价指标数据集

采用熵权法,选择 9 种指标进行评价,分别为凋落物储量、凋落物最大持水量、有效拦蓄量、土壤容重、毛

管孔隙度、非毛管孔隙度、毛管持水量、最大持水量、田间持水量(表 8)。综合 9 项指标进行权重赋值来评价宁夏罗山地区 3 种不同林分类型水源涵养能力。

表 7 三种林分类型土壤物理性质和持水特征

Table 7 Hysical properties and water holding characteristics of three forest types

林分类型 Stand type	容重 Volume weight/ (g/cm ³)	自然含水率 Natural moisture content/%	最大持水量 Max amount of water holding capacity/ (g/kg)	田间持水量 Field moisture capacity/ (g/kg)	毛管持水量 Capillary moisture capacity/ (g/kg)	非毛管孔 Non-capillary porosity/%	毛管孔隙 Capillary porosity/%	总孔隙 Total porosity/%
青海云杉 <i>Picea crassifolia</i>	0.64±0.12a	46.05±3.41b	1355.17±300.03b	738.25±158.19c	998.69±167.11c	16.38±3.61a	57.11±4.43b	73.49±5.24c
油松 <i>Pinus tabuliformis</i>	0.5±0.05ab	56.63±3.36b	1770.5±189.04b	1105.26±163.95b	1521.08±265.49b	11.17±5.39a	71.36±8.16a	82.53±2.8b
云杉+油松 <i>Picea crassifolia</i> + <i>Pinus tabuliformis</i>	0.38±0.05b	72.56±8.30a	2570.96±352.25a	1658.99±122.63a	2272.34±286.11a	10.55±1.51a	81.13±1.48a	91.68±1.48a

表 8 三种不同林分类型评价指标数据

Table 8 Data on evaluation indicators for three different forest types

林分类型 Stand type	A ₁	A ₂	A ₃	A ₄	A ₅	A ₆	A ₇	A ₈	A ₉
青海云杉 <i>Picea crassifolia</i>	40.18	67.76	32.04	1.29	57.11	16.38	998.69	1355.17	738.25
油松 <i>Pinus tabuliformis</i>	37.32	63.29	34.08	1.00	71.36	11.17	1521.08	1770.50	1105.26
云杉+油松 <i>Picea crassifolia</i> + <i>Pinus tabuliformis</i>	51.07	95.08	63.92	0.76	81.13	10.55	2272.34	2570.96	1658.99

A₁: 枯落物储量 litter reserve; A₂: 枯落物最大持水量 Maximum litter-holding capacity; A₃: 有效拦蓄量 Effective storage capacity; A₄: 土壤密度 Soil density; A₅: 毛管孔隙度 Capillary porosity; A₆: 非毛管孔隙度 Non-capillary porosity; A₇: 毛管持水量 Capillary water holding capacity; A₈: 最大持水量 Maximum water holding capacity; A₉: 田间持水量 Field water holding capacity

2.4.2 构造标准化指标矩阵和权重值

先求出每一列的和,再用每行的数据除以列和,形成新的标准化矩阵(表 9),然后利用公式计算出各个指标的熵值和各林分类型的权重值(表 10)。得到凋落物储量占 3%,凋落物最大持水量占 6%,有效拦蓄量占 20%,土壤容重占 8%,毛管孔隙度占 4%,非毛管孔隙度占 7%,毛管持水量占 20%,最大持水量占 13%,田间持水量占 19%。

表 9 各指标的标准化矩阵

Table 9 Standardized matrix for each indicator

林分类型 Stand type	A ₁	A ₂	A ₃	A ₄	A ₅	A ₆	A ₇	A ₈	A ₉
青海云杉 <i>Picea crassifolia</i>	0.31	0.30	0.25	0.42	0.27	0.43	0.21	0.24	0.21
油松 <i>Pinus tabuliformis</i>	0.29	0.28	0.26	0.33	0.34	0.29	0.32	0.31	0.32
云杉+油松 <i>Picea crassifolia</i> + <i>Pinus tabuliformis</i>	0.40	0.42	0.49	0.25	0.39	0.28	0.47	0.45	0.47

表 10 各指标权重值

Table 10 Weights of each indicator

A ₁	A ₂	A ₃	A ₄	A ₅	A ₆	A ₇	A ₈	A ₉
0.03	0.06	0.20	0.08	0.04	0.07	0.20	0.13	0.19

2.4.3 不同林分类型水源涵养能力的综合评价

不同林分类型指标标准化的值与权重的乘积之和为综合评价(表 11),综合评价的大小代表了水源

涵养能力的大小,所以 3 种林分类型水源涵养能力大小依次为青海云杉油松混交林(0.43)>油松纯林(0.30)>青海云杉纯林(0.27)。

表 11 水源涵养能力的综合评价

Table 11 Comprehensive evaluation of water conservation capacity

林分类型 Stand type	A ₁	A ₂	A ₃	A ₄	A ₅	A ₆	A ₇	A ₈	A ₉	综合值 Composite value
青海云杉 <i>Picea crassifolia</i>	0.01	0.02	0.05	0.03	0.01	0.03	0.04	0.03	0.04	0.27
油松 <i>Pinus tabulaeformis</i>	0.01	0.02	0.05	0.03	0.01	0.02	0.06	0.04	0.06	0.30
云杉+油松 <i>Picea crassifolia</i> + <i>Pinus tabulaeformis</i>	0.01	0.03	0.10	0.02	0.01	0.02	0.09	0.06	0.09	0.43

3 讨论

3.1 不同林分类型与凋落物储量的关系

不同林分类型凋落物储量及厚度反映了森林生态系统的养分输入和能量流动以及森林的生态水文效应^[9,22-23]。刘宇、孙拥康等^[4,24]的研究结果表明,混交林的凋落物厚度和储量要大于纯林,且半分解层的厚度和储量大于未分解层;而杨良辰、周长亮等^[14,21]的研究结果有所不同,他们认为混交林的厚度小于纯林,且半分解层的厚度和储量整体小于未分解层。本研究结果显示,与刘宇、孙拥康等^[4,24]的结果相似,青海云杉油松混交林凋落物的总厚度和总储量显著高于青海云杉纯林和油松纯林($P<0.05$),3 种林分类型的半分解层的厚度和储量高于未分解层。这可能是因为,一方面,凋落物厚度和储量大小受林分类型、林分密度、林分郁闭度、凋落物分解速率和气候水热条件及其地上微环境等的影响^[4,24],还有可能受到该研究区域的高海拔、山区气候条件的影响^[25-26];另一方面,受到林分类型凋落物组成成分、叶片的形状、内含物和生理生化特性的影响,使得分解周期或速率不同^[27]。

3.2 不同林分类型与凋落物水文效应的关系

凋落物的水文效应在森林生态系统水循环中有着非常重要的作用,对掌握森林生态水文过程有重大意义。凋落物具有疏松多孔的结构,使得水分通过表面张力吸附在疏松多孔的结构中,导致有很好的持水性能^[7]。在本研究中,最大持水量与最大持水率都显示相同的规律,即青海云杉油松混交林大于青海云杉纯林和油松纯林。这与胡静霞等^[28]的研究结果不同,他们认为最大持水量与最大持水率的规律不相同,这可能是因为 3 种林分类型凋落物储量、厚度、分解程度以及研究区域等的不同而造成。但与杨良辰等^[14]的研究结果一致,都显示最大持水量与最大持水率有相同的规律。

由于最大持水率和最大持水量只能反应凋落物持水 24h 后的最大值,而不能反映 3 种林分类型凋落物持水的实际情况,所以,它们不能反映真实的对降雨的拦截能力,一般用有效拦蓄量来反映凋落物对降水的实际拦蓄潜力^[17]。有效拦蓄量越大,越有利于水土保持,减少地表径流。本研究显示,有效拦蓄量在未分解层和半分解层中,均是青海云杉油松混交林>青海云杉>油松,且半分解层高于未分解层,这点与胡静霞等人的研究结果一致。可能是由于青海云杉油松混交林的凋落物厚度和储量大于云杉纯林和油松纯林,以及半分解后的凋落物表面积增大,从而持水量增加。

本研究发现从整体凋落物分层持水动态和吸水动态变化看,不同林分凋落物半分解层和未分解层持水量和吸水速率均表现为青海云杉油松混交林大于其它两个纯林,且在同一林分类型下,凋落物半分解层持水量和吸水速率均高于未分解层。说明青海云杉油松混交林的持水能力强于青海云杉纯林和油松纯林。对 0.25—24h 之间 3 种林分类型凋落物的持水量和吸水速率分别于与浸泡时间进行回归分析,得出凋落物持水量与浸泡时间呈对数函数回归关系($R^2>0.90$),凋落物吸水速率与浸泡时间呈幂函数回归关系($R^2>0.90$)。这与孙拥康、王忠禹等人^[4,23]的研究结果一致^[7]。

3.3 不同林分类型与土壤水文效应的关系

土壤水文效应极大地影响着森林涵养水源功能、水土保持的能力和植被的生长发育等^[29]。本研究中,3种林分类型的土壤容重青海云杉油松混交林的最低,其次是油松纯林,最后是青海云杉纯林最大,从土壤持水的能力来看,青海云杉油松混交林显著大于油松纯林和青海云杉纯林($P<0.05$),自然含水率的规律跟土壤持水能力的规律一样,而毛管孔隙度、总孔隙度的规律与土壤容重的相反。这与孙拥康、杨良辰等^[4,14]的研究结论一致,这说明林地土壤容重的大小与土壤的紧实度和林分类型及其不同林地地表凋落物等有关^[30],由于不同林地地表的凋落物储量、组成、持水性能及其地下根系对土壤水分的吸收、凋落物的分解等存在差异,从而造成土壤理化性质的差异^[31-34]。所以,青海云杉油松混交林的水源涵养能力及其水土保持能力比油松纯林和青海云杉纯林强,可以更大的减少地表径流和水土流失,从而改善生态环境质量^[35]。

3.4 不同林分类型水源涵养能力的综合评价

凋落物层和土壤层分别为森林水文效应的第二作用层和第三作用层,在水源涵养和水土保持以及养分输入、物质循环等方面有重要意义,它两相互影响、相互作用^[4-5,36]。所以,在评估这3种典型林分类型凋落物层和土壤层水源涵养能力时,本研究运用熵权法^[14]对3种林分类型水源涵养能力进行评估,得到青海云杉油松混交林(0.43)>油松纯林(0.30)>青海云杉纯林(0.27),即青海云杉油松混交林的水源涵养能力最大,油松纯林次之,最后是青海云杉纯林。这与杨良辰、周长亮等人的研究结果一致,也认为混交林的水源涵养能力大于纯林^[14,21]。

4 结论

宁夏罗山3种典型林分类型凋落物层和土壤层的水文效应和水源涵养能力都受到林分类型的影响。如下:(1)3种林分类型凋落物的总储量青海云杉油松混交林最大,且青海云杉油松混交林的凋落物总储量显著高于云杉和油松纯林($P<0.05$);(2)最大持水量和最大持水率以及有效拦蓄量的大小顺序均为青海云杉油松混交林最大,云杉纯林次之,油松纯林最小,且凋落物持水量与浸泡时间呈对数函数回归关系,凋落物吸水速率与浸泡时间呈幂函数回归关系,两者 R^2 都在0.9以上;(3)从3种林分类型的土壤物理性质和持水特性得出,3种林分类型的土壤层水文效应的等级排序为云杉油松混交林>油松纯林>青海云杉纯林;(4)最后,通过对3种林分类型水源涵养能力的综合评价可以得出青海云杉油松混交林(0.43)>油松林(0.3)>青海云杉林(0.27)。综上得到,青海云杉油松混交林凋落物层和土壤层的水源涵养能力最优。

参考文献(References):

- [1] 徐雨晴,周波涛,於琰,石英,徐影. 气候变化背景下中国未来森林生态系统服务价值的时空特征. 生态学报, 2018, 38(6): 1952-1963.
- [2] 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): 1-8.
- [3] 袁菲,张星耀,梁军. 基于有害干扰的森林生态系统健康评价指标体系的构建. 生态学报, 2012, 32(3): 964-973.
- [4] 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.
- [5] 杨晓霞,赵锦梅,张雪,樊宇航,张斌,王婧楠,张碧艳. 祁连山东段山地典型灌丛枯落物及土壤水源涵养功能研究. 干旱区地理, 2022, 45(1): 197-207.
- [6] Liu Y X, Shi W J, Tao F L, Shi X L, Fu B J. A global synthesis of multi-factors affecting water storage capacity in forest canopy, litter and soil layers. Geophysical Research Letters, 2023, 50(3): e2022GL099888.
- [7] 吴迪. 九龙山不同林分枯落物层和土壤层水文效应研究[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2014.
- [8] 王德连,雷瑞德,韩创举. 国内外森林水文研究现状和进展. 西北林学院学报, 2004, 19(2): 156-160.
- [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] 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.
- [11] Stocker B D, Tumber-Dávila S J, Konings A G, Anderson M C, Hain C, Jackson R B. Global patterns of water storage in the rooting zones of vegetation. Nature Geoscience, 2023, 16(3): 250-256.

- [12] 余新晓. 森林生态水文研究进展与发展趋势. 应用基础与工程科学学报, 2013, 21(3): 391-402.
- [13] 曹兵, 汪泽鹏. 宁夏罗山国家级自然保护区综合科学考察. 银川: 阳光出版社, 2019.
- [14] 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.
- [15] 曹兵, 秦伟春. 宁夏罗山森林资源. 银川: 阳光出版社, 2019.
- [16] 徐定兰. 官山森林大样地凋落物产量、储量及分解动态[D]. 南昌: 江西农业大学, 2019.
- [17] 赵晓春, 刘建军, 任军辉, 刘斌, 母吉君. 贺兰山 4 种典型森林类型凋落物持水性能研究. 水土保持研究, 2011, 18(2): 107-111.
- [18] 魏文俊, 王兵, 冷冷. 宁夏六盘山落叶森林凋落与枯落物分布及持水特性的研究. 内蒙古农业大学学报: 自然科学版, 2006, 27(3): 19-23.
- [19] 王玲. 油松人工林植被-凋落物-土壤特征的密度效应[D]. 北京: 北京林业大学, 2020.
- [20] 张雷燕, 刘常富, 王彦辉, 时忠杰, 何常清, 熊伟, 于澎涛. 宁夏六盘山南侧森林枯落物及土壤的水文生态功能研究. 林业科学研究, 2007, 20(1): 15-20.
- [21] 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. 林业与生态科学, 2022, 37(3): 238-245.
- [22] Zhang W P, Fornara D, Yang H, Yu R P, Callaway R M, Li L. Plant litter strengthens positive biodiversity-ecosystem functioning relationships over time. Trends in Ecology & Evolution, 2023, 38(5): 473-484.
- [23] 王忠禹, 刘国彬, 王兵, 汪建芳, 肖婧, 李兆松. 黄土丘陵区典型植物枯落物凋落动态及其持水性. 生态学报, 2019, 39(7): 2416-2425.
- [24] 刘宇, 郭建斌, 王彦辉, 刘泽彬, 邓秀秀, 张桐, 熊伟, 左海军. 宁夏六盘山不同密度华北落叶松人工林枯落物水文效应. 北京林业大学学报, 2016, 38(8): 36-44.
- [25] Bradford M A, Warren II R J, Baldrian P, Crowther T W, Maynard D S, Oldfield E E, Wieder W R, Wood S A, King J R. Climate fails to predict wood decomposition at regional scales. Nature Climate Change, 2014, 4(7): 625-630.
- [26] 张引, 黄永梅, 周长亮, 梁文俊. 冀北山地 5 个海拔梯度油松林枯落物与土壤水源涵养功能研究. 水土保持研究, 2019, 26(2): 126-131.
- [27] 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. 水土保持研究, 2017, 24(6): 216-221, 226.
- [28] 胡静霞, 杨新兵, 朱辰光, 温亚飞, 钟良子, 马俊杰. 冀西北地区 4 种纯林枯落物及土壤水文效应. 水土保持研究, 2017, 24(4): 304-310.
- [29] 宋庆丰, 杨新兵, 张金柱, 曹云生, 张伟, 冯学全. 雾灵山典型林分枯落物和土壤水文效应. 生态环境学报, 2009, 18(6): 2316-2320.
- [30] Zhang Q Y, Jia X X, Li T C, Shao M G, Yu Q, Wei X R. Intensification of water storage deficit in topsoil but not deep soil in a semi-humid forest after excluding precipitation for two years. Journal of Hydrology, 2022, 605: 127374.
- [31] 陈琳, 赵廷宁, 赵陟峰. 晋西半干旱黄土地区典型林分枯落物及土壤水文效应. 安徽农业科学, 2011, 39(23): 14106-14108.
- [32] 蒲嘉霖, 刘亮. 亚热带森林凋落物分解特征及水文效应. 水土保持研究, 2019, 26(6): 165-170.
- [33] 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.
- [34] Lebrija-Trejos E, Hernández A, Wright S J. Effects of moisture and density-dependent interactions on tropical tree diversity. Nature, 2023, 615(7950): 100-104.
- [35] Yao Y, Liu Y X, Zhou S, Song J X, Fu B J. Soil moisture determines the recovery time of ecosystems from drought. Global Change Biology, 2023, 29(13): 3562-3574.
- [36] Li Z K, Li X Y, Zhou S, Yang X F, Fu Y S, Miao C Y, Wang S, Zhang G H, Wu X C, Yang C, Deng Y H. A comprehensive review on coupled processes and mechanisms of soil-vegetation-hydrology, and recent research advances. Science China Earth Sciences, 2022, 65(11): 2083-2114.