

DOI: 10.5846/stxb202004170921

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.

Cheng C, He K N, Yu G F, Chai S X. Comparative study on water conservation capacity of different forest types of artificial forest in arid and semi-arid area. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(5): 1979-1990.

干旱半干旱区不同林型人工林水源涵养能力比较研究

程 唱^{1,2,3}, 贺康宁^{1,2,3,*}, 俞国峰⁴, 柴世秀⁴

1 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

2 北京市水土保持工程技术研究中心, 北京 100083

3 林业生态工程教育部工程研究中心, 北京 100083

4 青海省西宁市大通土族回族自治区气象局, 西宁 810100

摘要:通过引入模糊物元模型优化水源涵养能力估算方法, 从而为研究区林分结构调整、水源涵养能力提升提供科学依据。运用欧式贴适度, 以青海省大通县塔尔沟小流域 6 种不同林型人工林云杉×白桦混交林(YB)、云杉×青杨混交林(YQ)、云杉×落叶松混交林(YL)、云杉纯林(Y)、落叶松纯林(L)、青杨纯林(Q)作为研究对象, 定量评价其水源涵养能力。结果表明: 欧式贴适度大小排序为 YB(0.794) > YQ(0.723) > YL(0.655) > Y(0.494) > L(0.416) > Q(0.270), 欧式贴适度越大, 该林分类型水源涵养能力更强。6 种林型中, 白桦×青杨混交林水源涵养能力最强, 青杨林水源涵养能力最差。

关键词:干旱半干旱区; 水源涵养能力; 模糊物元模型; 欧式贴适度

Comparative study on water conservation capacity of different forest types of artificial forest in arid and semi-arid area

CHENG Chang^{1,2,3}, HE Kangning^{1,2,3,*}, YU Guofeng⁴, CHAI Shixiu⁴

1 School of Soil and Water Conservation, Key Laboratory of State Forestry Administration on Soil and Water Conservation, Beijing 100083, China

2 Beijing Engineering Research Center of Soil and Water Conservation, Beijing 100083, China

3 Engineering Research Center of Forestry Ecological Engineering of Ministry of Education, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China

4 Meteorological Bureau of Datong Tu and Hui Autonomous Region, Xining City, Qinghai Province, Xining 810100, China

Abstract: Drought, as a natural phenomenon of abnormal regional water shortage, has a profound impact on the ecological environment. As the global climate changes and the frequency of abnormal climate events increases, the form of drought in my country will become increasingly severe in the future. The degree of forest canopy closure, forest density, tree species composition and age composition in this study area are extremely unreasonable, the structure and function of the plantation are single and the stability is poor, and problems such as pests, pests and rodents continue to appear. Due to the lack of tending management, the unadjusted structure of the initial timber forest has led to its low comprehensive ecological function. In order to ensure the long-term and stable ecological function of the forest, it is urgent to evaluate its water conservation function and regulate and manage it. This paper combines the fuzzy matter-element model and establishes an evaluation system consisting of 16 indicators including forest evapotranspiration, forest canopy water retention characteristics, soil physical properties, water retention characteristics, litter physical properties, and water retention characteristics. Evaluate the weight of different indicators and evaluate the water conservation capacity. In this paper, 6 different forest types in the Targou, Datong County, Qinghai Province, spruce × birch mixed forest (YB), spruce × green

基金项目: 国家重点研发计划重点专项(2017YFC0504604)

收稿日期: 2020-04-17; 网络出版日期: 2021-01-05

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

poplar mixed forest (YQ), spruce $\times$ larch mixed forest (YL), spruce Pure forest (Y), pure larch forest (L), and pure poplar forest (Q) are the research objects to quantitatively evaluate their water conservation capacity. The results show that the order of European closeness is YB (0.794) > YQ (0.723) > YL (0.655) > Y (0.494) > L (0.416) > Q (0.270). The greater the European closeness, the water source of this forest stand type. Stronger ability to conserve. Among the six forest types, the birch $\times$ poplar mixed forest has the strongest water conservation capacity, and the Qing poplar forest has the worst water conservation capacity. By assessing the water conservation capacity of forests, exploring the water balance of the basin, and paying attention to the hydrological effects of forests, it is of great significance for regulating the runoff of the basin and improving the local microclimate. In this paper, the fuzzy matter-element model is used to analyze and study the water conservation capacity of different forest types of plantations, and provide a scientific reference for the selection of local afforestation tree species, the improvement of forest water conservation capacity, the transformation of inefficient forests and the adjustment of stand structure.

Key Words: arid and semi-arid region; water conservation capacity; fuzzy matter-element model; European-style closeness

干旱作为一种区域水分异常缺乏的自然现象,对生态环境具有深远影响^[1]。随着全球气候改变和气候异常事件发生频率增加^[2-3],未来我国的干旱形式将日益严峻。全球气候变暖导致干旱事件逐年增加,对森林生态系统造成了巨大的负面影响^[4-6]。区域变暖和干旱胁迫减少了树木胸径生长和生物量积累^[7]、降低森林群落物种的多样性、导致植物生长特性发生变化等^[8]。区域干旱还导致了生态环境脆弱,生物多样性降低,水土流失,土地荒漠化、盐碱化,草场退化,地区贫困加剧等一系列生态、经济和社会发展问题^[9-11]。

青海省海东黄土地地区于20世纪80年代开始西北地区植树种草活动,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工程,形成了目前的基本规模。历经近20年封禁管理,随着林木的生长,导致现有的林分郁闭程度、林分密度树种组成和年龄组成极其不合理,人工林结构和功能单一及稳定性较差,病虫害等问题不断出现。由于缺乏抚育管理,初始用材林的结构未经调整导致其综合生态功能较低,为保证森林长期稳定地发挥生态作用,迫切需要评估其水源涵养功能,对其进行调控经营。

国内对于水源涵养林效益的研究始于20世纪70年代,至20世纪80年代日渐兴盛^[12]。水源涵养是陆地生态系统重要的生态服务功能之一,具有复杂性和动态性特征^[13]。多数研究中,狭义地将水源涵养功能等同于降雨的拦蓄能力或对径流地调节能力^[14]。逐渐地,森林对降水的影响^[15]、森林蒸发散、森林对径流的影响^[16]和森林对水质的影响等受到重视。国内外学者通过不同的计算方法对流域水源涵养功能进行研究,如丁程锋^[17]利用InVEST模型,结合气候、土壤、地形等因素定量评估乌鲁木齐河流域水源涵养功能;刘璐璐^[18]等根据综合蓄水能力法,分析南北盘江流域森林生态系统的水源功能,不同方法均存在计算繁琐等问题。近年来,国内学者对水源涵养能力评价的研究主要集中于对林冠层^[19]、土壤层^[20]、枯落物层^[21]某一特定层的研究,而在整体层次水源涵养能力研究和评价方法的选用显得很片面。在对相关林型的研究中,黄乾^[22]通过测定枯落物层及土壤层持水量,评估不同密度青海云杉人工林水源涵养功能;刘凯^[23]通过测定不同林分土壤特性评估起水源涵养功能;王先棒^[24]运用层次分析法评估北川河流域不同林型水源涵养能力。前人的研究仍存在评估不准确、不客观的问题,由此综合前人已有的研究,本文以青海省大通县塔尔沟流域6种不同林型的人工林为研究对象,引入模糊物元模型优化水源涵养能力估算方法。

鉴于水源涵养能力评价中各指标的不确定性、复杂性和模糊性,采用熵权法对指标进行客观赋权,结合模糊物元模型,引入欧式贴近度概念,相较于层次分析法、灰色关联分析法、模糊综合评价法等更加客观、简单^[25]。通过建立由林地蒸散发,林冠持水特性,土壤物理性质、持水特性,枯落物物理性质、持水特性等16个指标构成的评价体系,运用欧式贴近度进一步评价不同指标权重,评价水源涵养能力。塔尔沟流域地处西北干旱半干旱区,生态敏感、脆弱,林水矛盾是当地林分改造的重要问题,通过评估森林的水源涵养能力,探究流域水量平衡,关注森林的水文效应,对于调节流域径流、改善当地的小气候有着重要的意义。本文通过模糊

物元模型对不同林分类型人工林水源涵养能力进行分析研究,为当地造林树种选择、森林水源涵养能力提升、低效林改造和林分结构调整提供科学参考。

1 研究区概况

研究区位于青海省东北部的西宁市大通县塔尔沟小流域。地理坐标为 100°51′—101°56′E,36°43′—37°23′N。地处祁连山东段,位于黄土高原与青藏高原的过渡地区。该地沟壑纵横、地形条件复杂,海拔平均 2903.4m。属于高原大陆性气候,气候垂直变化明显,年平均温度 4.9℃,年平均日照 2605h、太阳辐射强烈,降水集中于 6—8 月,年平均降水量 523.3mm,年平均蒸发量 1762.8mm。研究区土壤主要为山地棕褐土、栗钙土和黑钙土。其森林植被资源丰富,其中草本植物种类繁多,造林树种主要为青海云杉(*Picea crassifolia* Kom.)、华北落叶松(*Larix principis-rupprechtii* Mayr.)、青杨(*Populus cathayana* Rehd.)、白桦(*Betula platyphylla* Suk.)、祁连圆柏(*Juniperus przewalskii* Kom.)等。

2 研究方法

2.1 样地设置与调查

试验于 2019 年 4 月至 2019 年 9 月进行,在充分调查的基础上,选取林龄相近、长势良好、立地条件相似的云杉×白桦混交林、云杉×青杨混交林、云杉×落叶松混交林、云杉纯林、落叶松纯林、青杨纯林 6 种典型林分作为研究对象,分别记作 YB、YQ、YL、Y、L、Q,每种林分类型设置三个面积为 20m×20m 的样地,共 18 块样地。记录每块样地的海拔、坡位、坡度等信息,对样地内的乔木树种进行每木检尺,记录平均胸径、树高、郁闭度等信息。调查样地的基本情况如表 1。

表 1 调查样地基本情况
Table 1 Basic situation of the survey plot

林型 Forest type	样地号 Plot number	地理位置 Geographic location	海拔 Altitude/m	坡位 Slope position	坡度 Slope/(°)	郁闭度 Canopy/%	平均树高 Average tree high/m	平均胸径 Average breast diameter/cm
YB	A1	37°01'57"N, 101°40'33"E	2955.6	中坡	18	73.00	7.88	9.05
	A2	37°01'50"N, 101°40'51"E	2939.9	中坡	21	71.47	8.23	8.58
	A3	37°02'12"N, 101°40'09"E	2945.7	中坡	20	72.56	8.15	8.87
YQ	B1	37°02'65"N, 101°40'19"E	2863.1	下坡	17	70.25	7.46	9.64
	B2	37°02'21"N, 101°40'36"E	2876.9	下坡	8	66.10	8.16	9.80
	B3	37°02'65"N, 101°40'19"E	2903.5	下坡	10	68.17	7.98	9.70
YL	C1	37°01'57"N, 101°40'33"E	2877.5	中坡	19	64.83	8.12	9.10
	C2	37°01'58"N, 101°41'10"E	2956.9	中坡	20	68.67	11.34	11.92
	C3	37°02'04"N, 101°41'03"E	2913.4	中坡	18	67.44	10.56	10.88
Y	D1	37°01'54"N, 101°40'50"E	2960.3	中坡	15	92.96	10.96	11.71
	D2	37°01'57"N, 101°41'06"E	2949.3	中坡	24	91.95	9.11	10.87
	D3	37°01'60"N, 101°40'08"E	2958.6	中坡	18	91.97	9.23	10.95
L	E1	37°01'57"N, 101°40'33"E	2840.0	中坡	14	63.96	12.61	14.25
	E2	37°01'55"N, 101°40'38"E	2910.2	中坡	13	62.06	11.64	12.70
	E3	37°01'57"N, 101°40'33"E	2904.2	中坡	12	63.55	12.05	13.87
Q	F1	37°02'02"N, 101°41'21"E	2863.1	中坡	25	73.99	8.75	14.19
	F2	37°02'07"N, 101°41'22"E	2865.4	中坡	24	72.15	7.66	13.65
	F3	37°02'04"N, 101°41'19"E	2887.1	中坡	20	70.68	7.51	13.64

YB: 云杉×白桦混交林 *Picea crassifolia* Kom. × *Betula platyphylla* Suk. YQ: 云杉×青杨混交林 *Picea crassifolia* Kom. × *Populus cathayana* Rehd. YL: 云杉×落叶松混交林 *Picea crassifolia* Kom. × *Larix principis-rupprechtii* Mayr. Y: 云杉纯林、*Picea crassifolia* Kom. L: 落叶松纯林、*Larix principis-rupprechtii* Mayr. Q: 青杨纯林 *Populus cathayana* Rehd.

2.2 指标测定

2.2.1 林地蒸散发

在每块样地进行每木胸径测量,平均划分为4个径级,每个径级选标准木一棵,在标准木胸高处安装探针测定液流,进而测定林木蒸腾量^[26];取连带草本的土壤,使用土壤蒸发皿测定土壤(含草本植物和枯落物)蒸发量;林地蒸散发量为林木蒸腾量与土壤蒸散发量之和。

2.2.2 林分结构层面

使用 ArcGIS 中的泰森多边形对林木空间位置图进行邻域分析^[27-29],生成 Voronoi 多边形图,通过大小比数和角尺度反映对象木与邻近木的关系,进一步描述样地林分结构特点^[30]。

(1) 大小比数

大小比数(U_i)用于描述林分林木大小分化程度,表达式为:

$$U_{ij} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n K_{ij} \quad (1)$$

其中, $K_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{当第 } j \text{ 株最近邻近木大于对象木} \\ 0, & \text{否则} \end{cases}$

林分整体大小比数 U 的计算公式为:

$$U = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N U_i \quad (2)$$

其中, U 为林分平均大小比数; N 为林分对象木的总数; U_i 表示的是第 i 株对象木的大小比数。

(2) 角尺度

角尺度(W_i):用于描述林分林木个体水平地面上的分布格局,表达式为:

$$W_{ij} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n Z_{ij} \quad (3)$$

其中, $Z_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{当第 } j \text{ 个夹角 } \alpha \text{ 小于标准角 } \alpha_0 \\ 0, & \text{否则} \end{cases}$, $\alpha_0 = \frac{360^\circ}{n}$, n 为邻近木的株数。

林分整体角尺度 W 的计算公式为:

$$W = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N W_i \quad (4)$$

其中, W 为林分平均角尺度; N 为对象木的总数; W_i 表示的是第 i 株对象木的角尺度。

2.2.3 林冠层面

(1) 树干流

选择直径不同但能代表该树种普遍干形、分枝角度的6棵典型木,在其树干上盘绕剖开的塑料软管,软管与树干的间隙使用玻璃胶进行填充,软管末端插入塑料壶中收集树干径流,水量记作 V ,测定树干径流深度 H_1 。

$$H_1 = \frac{V}{S_1} \times \theta \quad (5)$$

其中, S_1 表示典型木林冠投影面积, θ 表示林分郁闭度。

(2) 穿透雨

将若干上口径为18cm,高为30cm的塑料桶制作为简易雨量筒,采用6×6的点阵式布置制作好的简易雨量筒,各桶间距为3m,收集桶中降水水量记作 Q ,测定穿透雨水深 H_2 。

$$H_2 = \frac{Q}{S_2} \quad (6)$$

其中, S_2 表示简易雨量筒的桶口面积。

(3) 林冠截留量

乔木林冠截留量采用林外降雨与穿透雨和树干径流量的差值来表示。

2.2.4 土壤层面

(1) 土壤物理性质

在每个样地内随机挖 2 个土壤剖面,用环刀分 0—20,20—40,40—60cm 3 层取样,每层取 3 个重复。采用烘干称量法测定土壤容重、孔隙度、持水量、饱和导水率。

(2) 土壤持水性

土壤饱和蓄水量和土壤非毛管蓄水量是评价土壤蓄水性能的重要指标,计算公式如下:

$$W_t = 10000P_t h \quad (7)$$

$$W_0 = 10000P_0 h \quad (8)$$

$$W_c = 10000P_c h \quad (9)$$

式中: W_t 为土壤饱和蓄水量(m^3/hm^2); W_0 为土壤非毛管蓄水量(m^3/hm^2); W_c 为土壤毛管蓄水量(m^3/hm^2); P_t 为土壤总孔隙度(%); P_0 为土壤非毛管孔隙度(%); P_c 为土壤毛管孔隙度(%); h 为土层厚度(取 0.6m)。

2.2.5 枯落物层面

在样地以对角线形式设定 3 个 $1\text{m} \times 1\text{m}$ 的小样方,调查枯落物厚度并取样。将取回的样品称重记为 m_0 后,将样品置于烘箱,在 80°C 烘干至恒量后称重记为 m_1 。将烘干后的样品装入尼龙袋完全浸入水中 24h 后再次称量,记为 m_2 。计算枯落物蓄积量、自然含水率、最大持水量、最大持水率、最大拦蓄率、有效拦蓄率。其中最大持水率、有效拦蓄率是表示枯落物持水性质的评价指标,计算公式分别为:

$$C = \frac{(m_2 - m_1)}{m_1} \times 100\% \quad (10)$$

$$R_s = R_m - R_0 \quad (11)$$

$$W_a = (0.85R_m - R_0) M \quad (12)$$

C 为最大持水率, W_a 为有效拦蓄量(t/hm^2); R_s 为最大拦蓄率(%); R_m 为最大持水率(%); R_0 为自然含水率(%); M 为枯落物储量(t/hm^2)。

2.3 指标筛选

在干旱地区,森林水源涵养功能突出表现为森林的蓄水、保水能力,影响森林的蓄水、保水能力的因子有很多,一般通过林冠截留、枯落物持水及土壤性质来评估,而饱和蓄水量是直接反映其蓄水能力的重要指标,所以我们选择饱和蓄水量作为主导的影响因子,通过与其他因子进行相关性分析,筛选出的最终影响水源涵养功能的影响因子。

使用 SPSS 对土壤饱和蓄水量进行单因素 ANOVA 检验,组间显著性为 0.024 ($P < 0.05$),不同造林树种类型与土壤饱和蓄水量呈显著相关。

对 12 块样地下表所示 26 个指标进行双变量相关分析,采用 person 系数分析不同林分水源涵养指标相关性。由表 2 可知,穿透雨水深、截留量、蒸散发量、土壤容重、孔隙度、持水量、枯落物蓄积量、最大持水量、最大拦蓄率、有效拦蓄率是与土壤饱和蓄水量存在显著相关性的 16 个有效指标。

2.4 模型分析

运用物元分析理论^[31],通过欧式贴近度模糊物元模型,对不同造林类型的水源涵养能力进行评价,其中评价指标为筛选出的 16 个有效指标。

(1) 引入模糊物元概念,即描述事物的基本元,其表达式为:

$$R = (M, C, u) \quad (13)$$

$$\begin{array}{cccccc}
 & M_1 & M_2 & \cdots & M_m \\
 C_1 & u_{11} & u_{21} & \cdots & u_{m1} \\
 R = C_2 & u_{12} & u_{22} & \cdots & u_{m2} \\
 & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\
 C_n & u_{1n} & u_{2n} & \cdots & u_{mn}
 \end{array} \quad (14)$$

其中, R 为研究区四种造林类型 16 维复合模糊元; M_i 为第 i 种林分类型, $i=1, 2, 3, \dots, m, m=6$; C_j 为第 j 个评价指标, $j=1, 2, 3, \dots, n, n=16$; u_{ij} 为第 i 种林分类型第 j 个指标对应的模糊量值。

表 2 相关性分析结果表
Table 2 Correlation analysis result table

	影响因素 Influence factor	相关系数 Correlation coefficient	显著性 Distinctiveness	影响因素 Influence factor	相关系数 Correlation coefficient	显著性 Distinctiveness
林地 Woodland	蒸散发量	-0.807 *	0.013			
林冠层 Forest canopy	角尺度	-0.352	0.262	大小比数	-0.175	0.586
	树干径流深	0.433	0.159	穿透雨水深	-0.909 *	0.006
	截留量	0.929 *	0.004			
土壤层 Soil layer	土壤容重(0—20cm)	-0.776 *	0.026	土壤容重(20—40cm)	-0.637 *	0.026
	土壤容重(40—60cm)	-0.680 *	0.015	孔隙度(0—20cm)	0.421	0.173
	孔隙度(20—40cm)	0.661 *	0.019	孔隙度(40—60cm)	0.747 **	0.005
	持水量(0—20cm)	0.646 *	0.023	持水量(20—40cm)	0.665 *	0.018
	持水量(40—60cm)	0.688 *	0.041	饱和导水率(0—20cm)	-0.253	0.428
	饱和导水率(20—40cm)	0.218	0.497	饱和导水率(40—60cm)	0.521	0.082
	非毛管蓄水量	0.874 **	0.008			
枯落物层 Litter layer	枯落物蓄积量	0.807 **	0.009	自然含水率	-0.353	0.261
	最大持水量	0.86 *	0.042	最大拦蓄率	0.922 **	0.002
	有效拦蓄率	0.725 *	0.049			

* * 在 0.01 水平上显著相关, * 在 0.05 水平上显著相关。

(2) 从优隶度属原则, 描述各单项评估指标相对应的模糊量值的隶属程度。服从越小越优指标有穿透雨水深、蒸散发量、土壤容重, 其余指标均为越大越优型。

越大越优型:

$$u_{ij} = \frac{x_{ij} - x_{minij}}{x_{maxij} - x_{minij}} \quad (15)$$

越小越优型:

$$u_{ij} = \frac{x_{maxij} - x_{ij}}{x_{maxij} - x_{minij}} \quad (16)$$

式中: x_{ij} 为第 i 个灌木类型第 j 个指标对应的量值; x_{maxij} 、 x_{minij} 为 i 灌木类型第 j 个指标所对应的所有量值中的最大值和最小值。

(3) 差平方模糊物元。差平方模糊物元 R_3 由标准模糊物元 R_2 ($u_{0j}=1.0$) 与 R_1 各项差的平方求得, 其中, $\Delta_{ij} = (u_{0j} - u_{ij})^2$ 。

$$\begin{array}{cccccc}
 & M_1 & M_2 & \cdots & M_m \\
 C_1 & \Delta_{11} & \Delta_{21} & \cdots & \Delta_{m1} \\
 R_3 = C_2 & \Delta_{12} & \Delta_{22} & \cdots & \Delta_{m2} \\
 & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\
 C_n & \Delta_{1n} & \Delta_{2n} & \cdots & \Delta_{mn}
 \end{array} \quad (17)$$

(4)欧式贴近度。表示各评价方案与最优评价方案之间的贴近程度,欧式贴近度越大,该造林类型的水源涵养能力越强。由公式依次得到评价指标权重模糊物元 R_4 及欧式贴近度模糊物元 R_5 :

$$D_j = \frac{1}{x_j} \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m (\bar{x}_j - x_{ij})^2} \tag{18}$$

$$R_4 = \frac{D_j}{\sum_{i=1}^m D_j} \tag{19}$$

$$R_5 = 1 - \sqrt{\sum_{j=1}^n R_4 \Delta_{ij}} \tag{20}$$

式中: D_j 为第 j 个评价指标的变异系数; $\bar{x}_j$ 为第 j 个指标对应量值的平均值。

3 数据分析

3.1 林地蒸散发及林冠截留量分析

由表 3 得出 6 种林分截留量为 0.64—1.42mm 之间,平均为 1.11mm,表现为混交林大于纯林,针叶林大于阔叶林;蒸散发量为 371—422mm 之间,平均为 403.76mm,表现为纯林大于混交林。方差分析结果表示为混交林之间林冠截留量、林地蒸散发量差异均不显著($P>0.05$),纯林中针叶林间林冠截留量差异不显著($P>0.05$),林地蒸散发量差异显著($P<0.05$)。

表 3 不同林分类型林冠截留量和林地蒸散发量

Table 3 Canopy interception and forest land evapotranspiration in different forest types

	YB	YQ	YL	Y	L	Q
截留量 Retention/mm	1.40±0.06a	1.36±0.02b	1.42±0.07a	0.97±0.14c	0.89±0.05c	0.64±0.01d
蒸散发量 Evapotranspiration/mm	371.00±3.61e	385.00±10.01d	400.00±7.18c	415.00±3.00b	429.54±15.46a	422.00±2.42a

3.2 土壤层持水特性分析

由图 1 可以得出,不同林型的土壤容重均随着土壤层厚度的增加而增大,6 种林型不同土层容重均值变化范围在 0.93—1.26g/cm³之间。对于表土层,除了白桦×云杉混交林和云杉×青杨混交林的土壤容重小于 1.0g/cm³,其他 4 中林型表土层均大于 1.0g/cm³;对于 20—40cm 土层,白桦×云杉混交林土壤容重最小(1.00±0.09)g/cm³,青杨纯林容重最大(1.21±0.05)g/cm³;40—60cm 土层土壤容重大小排序为 YQ<YB<YL<Y<L<Q。根据方差分析结果,白桦×云杉、云杉×青杨两种混交林与纯林的土壤容重呈现出显著性差异($P<0.05$)。云杉×落叶松混交林仅在 20—40cm 土层与纯林的土壤容重呈现出显著性差异($P<0.05$)。各纯林间土壤容重差异并不明显($P>0.05$)。

由图 2 可知,不同林分类型的总孔隙度均随着土层厚度的增加而不断降低,大小变化范围为 48.51—62.33%,与容重呈相反的变化趋势。在不同土层深度,不同林型土壤孔隙度的大小排序均为 YB>YQ>YL>Y>

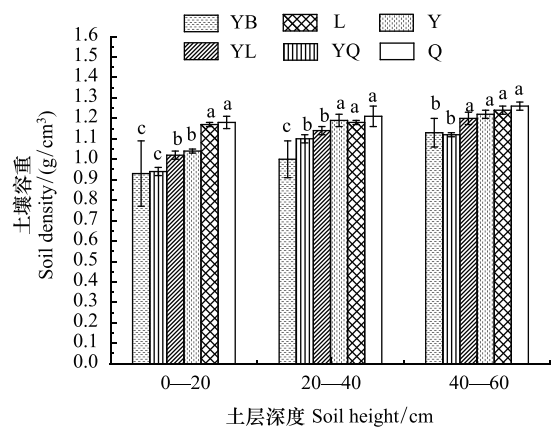


图 1 不同林分类型的土壤容重

Fig. 1 Soil bulk density of different forest types

YB: 云杉×白桦混交林 *Picea crassifolia* Kom. × *Betula platyphylla* Suk. YQ: 云杉×青杨混交林 *Picea crassifolia* Kom. × *Populus cathayana* Rehd. YL: 云杉×落叶松混交林 *Picea crassifolia* Kom. × *Larix principis-rupprechtii* Mayr. Y: 云杉纯林、*Picea crassifolia* Kom. L: 落叶松纯林、*Larix principis-rupprechtii* Mayr. Q: 青杨纯林 *Populus cathayana* Rehd.

$L>Q$ 。纯林和混交林的土壤孔隙度呈显著性差异 ($P<0.05$); 40—60cm 土层白桦×云杉混交林与其他两种混交林的土壤孔隙度呈显著性差异 ($P<0.05$), 在其他土层与其他两种混交林差异不明显 ($P>0.05$)。

对土壤持水性能指标进行分析, 结果图 3 所示, 0—60cm 土层土壤平均饱和持水量和非毛管蓄水量呈现相似的变化趋势。土壤饱和持水量变化范围为 41.24%—59.27%, 土壤非毛管蓄水量变化范围为 11.10—24.60 t/hm², 白桦×云杉混交林的两项指标值均为最大, 青杨的两项指标值均为最小。除落叶松、青杨纯林的土壤饱和持水量和云杉×落叶松混交林、云杉纯林的土壤非毛管蓄水量数值差异较小, 其他指标的数值差距总体较为显著。

3.3 枯落物层持水特性分析

由图 4 可知, 各林型枯落物蓄积量差异较大。6 种林型枯落物蓄积量在 6.85—35.00 t/hm² 之间, 大小排序为 $L>YL>Y>YB>YQ>Q$; 其中落叶松纯林枯落物蓄积量最大达 (35.00 ± 3.60) t/hm², 青杨纯林枯落物蓄积量最小达 (6.85 ± 0.35) t/hm², 最大值约为最小值的 5.1 倍。

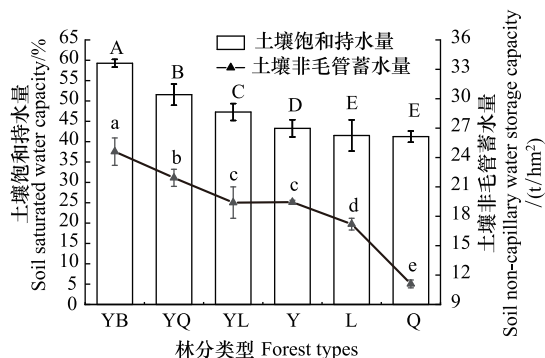


图 3 不同林分类型的土壤饱和持水量和非毛管蓄水量

Fig. 3 Soil saturated water capacity and non-capillary water storage capacity of different forest types

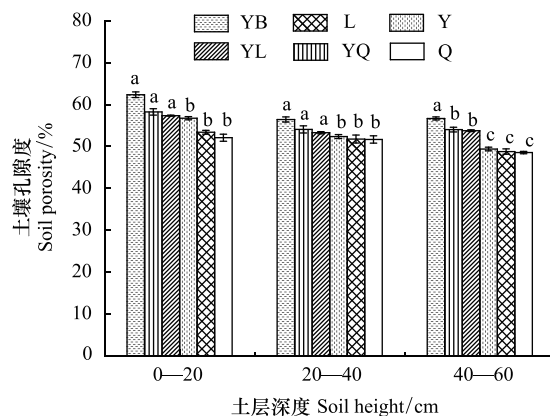


图 2 不同林分类型的土壤孔隙度

Fig. 2 Soil porosity of different forest types

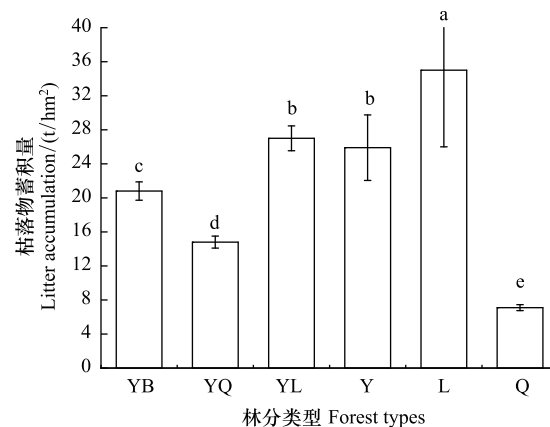


图 4 不同林分类型的枯落物蓄积量

Fig. 4 Litter accumulation in different forest types

由图 5 可以得出, 不同林型的枯落物最大持水量的变化范围为 78.44—178.00 t/hm², 大小排序为 $L>YL>Y>YB>YQ>Q$, 其中落叶松纯林枯落物最大持水量最大达 (243.31 ± 10.03) t/hm², 青杨纯林枯落物蓄积量最小达 (81.00 ± 7.56) t/hm²。

由图 6 可以得出, 枯落物最大拦蓄率和有效拦蓄率随着林分类型的变化呈现较相似的趋势, 枯落物最大拦蓄率变化范围为 15%—103%, 不同林分大小排序为 $L>Y>YL>YB>YQ>Q$, 6 种林型中青杨数值最低为 $15.00\%\pm4.00\%$; 不同林分枯落物有效拦蓄率变化范围为 8.70%—82.79%, 落叶松纯林数值最大为 $82.79\%\pm1.77\%$, 青杨纯林数值最小为 $8.70\%\pm1.30\%$ 。

3.4 水源涵养能力综合分析

(1) 欧式贴近度分析

对不同层次评价指标编号 C_1 — C_{16} , 其中 C_1 为林冠层指标, 代表林冠截留量; C_2 为林地蒸散发量; C_3 — C_{12}

为土壤层指标,依次代表0—20cm 土层容重、20—40cm 土层容重、40—60cm 土层容重、0—20cm 土层孔隙度、20—40cm 土层孔隙度、40—60cm 土层孔隙度、0—20cm 土层持水量、20—40cm 土层持水量、40—60cm 土层持水量和0—60cm 非毛管蓄水量; C_{13} — C_{16} 为枯落物层指标,依次代表枯落物蓄积量、最大持水量、最大拦蓄率、有效拦蓄率。

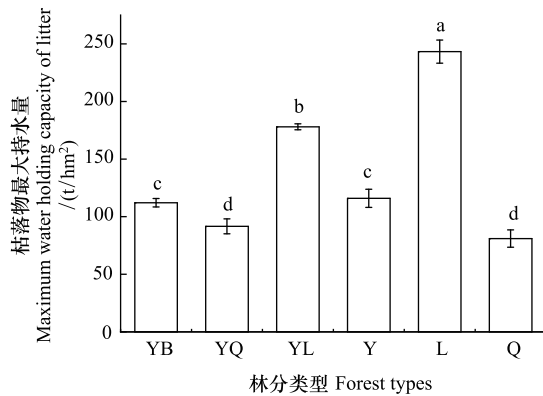


图5 不同林分类型的枯落物最大持水量

Fig. 5 Maximum water holding capacity of litter in different forest types

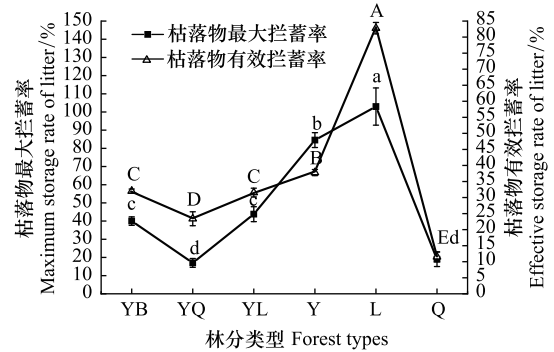


图6 不同林分类型的枯落物最大拦蓄率和有效拦蓄率

Fig. 6 Maximum storage rate and effective storage rate of litter in different forest types

将数据带入表达式 R 中,得到6种林型的水源涵养能力复合模糊元 R ,并根据上述方法依次求得 R_1 — R_5 。

	M_1	M_2	M_3	M_4	M_5	M_6
C_1	1.395	1.360	1.420	0.970	0.887	0.640
C_2	371.000	385.000	400.00	415.000	429.543	422.000
C_3	0.930	0.942	1.020	1.040	1.172	1.180
C_4	1.009	1.098	1.137	1.190	1.181	1.210
C_5	1.127	1.123	1.204	1.220	1.238	1.260
C_6	0.623	0.582	0.573	0.567	0.533	0.520
C_7	0.564	0.540	0.532	0.523	0.517	0.516
$R = C_8$	0.567	0.540	0.537	0.493	0.487	0.485
C_9	0.585	0.538	0.493	0.450	0.448	0.423
C_{10}	0.597	0.470	0.447	0.420	0.407	0.405
C_{11}	0.575	0.532	0.472	0.420	0.380	0.386
C_{12}	24.600	21.933	19.400	19.440	17.200	11.110
C_{13}	20.800	14.800	27.000	25.900	35.000	7.100
C_{14}	112.090	91.635	178.000	115.896	243.307	81.000
C_{15}	40.000	17.000	43.803	84.550	103.000	19.000
C_{16}	32.000	23.390	71.560	37.787	82.790	11.530
$R_5 = P_i$	0.794	0.723	0.655	0.494	0.416	0.270

由 R_5 可知,6种林分的欧式贴近度的大小顺序为:白桦×青杨混交林(0.794)>云杉×青杨混交林(0.723)

>云杉×落叶松混交林(0.655)>云杉纯林(0.494)>落叶松纯林(0.416)>青杨纯林(0.270)。欧式贴近度越大,则该评价方案越接近最优方案,该林分类型水源涵养能力更强。通过运算结果可知,白桦×青杨混交林的水源涵养能力最强,云杉×青杨混交林水源涵养能力稍次之,三种混交林水源涵养能力均高于纯林;三种纯林中,云杉纯林水源涵养能力最强,青杨水源涵养能力最差。因此,在该研究区内,白桦×青杨混交林、云杉×青杨混交林水源涵养能力较强;青杨纯林水源涵养能力较差。

(2) 林分饱和蓄水评价

如表4所示,不同林型土壤饱和蓄水变化范围为220.56—339.30 t/hm²,大小顺序与欧式贴近度值顺序一致。对饱和蓄水量与欧式贴近度值作相关性分析, P 值为0.003,相关系数 R 值为0.953,线性回归 R^2 为0.908,呈极显著正相关($P<0.01$)。

表4 不同林型土壤饱和蓄水量

Table 4 Soil saturated water storage capacity of different forest types

	YB	YQ	YL	Y	L	Q
土壤饱和蓄水量/(t/hm ²)	339.30±0.55a	324.19±0.16b	302.60±0.44c	286.70±0.28d	285.33±0.47d	220.56±0.87e
Soil saturated water storage						

4 讨论

塔尔沟流域位于干旱半干旱区,林地保水、蓄水能力成为评价森林水源涵养能力的重要标准,本研究通过欧式贴近度结果,结合土壤饱和蓄水量数值比较不同林型水源涵养功能。权重指标模糊元计算结果表明,不同层次所占权重大小排序为枯落物层>土壤层>林冠层>林地蒸散发。

在森林的不同作用层中,枯落物发挥着独特的生态水文功能。本次研究中,不同林型枯落物蓄积量表现为针叶林>混交林>落叶阔叶林,这与李阳等^[32]得出的针叶林纯林枯落物存量大于阔叶林纯林的结论一致,与杨良辰等^[33]在承德坝区得出的混交林枯落物蓄积量大于针叶林的结论不同。原因可能是塔尔沟小流域海拔较高,针叶林林下枯落物分解速率较慢,枯落物存量较大,累积的针叶枯落物造成土壤酸化,降低土壤微生物活性,进一步减缓甚至阻碍枯落物的分解;研究区枯落物持水特性与枯落物蓄积量大小排序相似,变化规律不同。三项指标均表现为针叶林远大于混交林与落叶阔叶林,与张佳楠^[34]在晋西黄土区得出的针阔混交林>针叶林结论不同。结合欧式贴近度结果,混交林水源涵养能力大于针叶林纯林;可能是由于混交林中阔叶树种枯落物的木质素、纤维和次生代谢产物含量较低,分解速度较快,能通过改善土壤通气性能提高水源涵养能力,但蓄积量较少直接影响其持水性能。

土壤层研究结果表明6种林分类型的土壤容重均随土层的加深而增大,土壤孔隙度均随土层的加深而减小,刘凯等、杨霞等^[35]也曾得出相似的变化规律。不同土层土壤容重均表现为纯林>混交林,土壤孔隙度表现为混交林>纯林,混交林中,白桦×云杉林土壤理化性质最好;纯林中,青杨林土壤理化性质最差。张宗应的研究结果也表明混交林土壤结构更疏松,土壤通气性和透水性更好。不同林型土壤饱和持水量和土壤非毛管蓄水量均为混交林>针叶林纯林>落叶阔叶林纯林,混交林对水分的静态涵养能力更强,这与刘凯在青海得出的混交林水源涵养能力大于纯林的结论一致。

林冠层截留量数值总体表现为混交林大于纯林,乌都^[36]在清水河县的研究也得出了相似的结论;纯林中针叶林大于落叶阔叶林,与前人的研究结果不完全一致。这主要由于青海省大通县针叶林的造林密度远大于落叶阔叶林的造林密度,导致林分郁闭度增大,减少穿透雨量,使针叶林纯林林冠截留量大于落叶阔叶林纯林。

干旱区90%的降水能以自然蒸散发的形式回归大气^[37],不同林型林地蒸散发量的差异体现着森林耗水及干旱状况的变化。本次研究结果表明纯林蒸散发量大于混交林蒸散发量,其中落叶松林蒸散发量最大,白桦×云杉林蒸散发量最小,可能是由于白桦×云杉林造林密度、林分结构更为适宜,进一步减少蒸散发;受干旱

胁迫影响较小,森林生长良好、水源涵养能力较好。

前人引入模糊物元模型对滇中城市水源地不同林型水源涵养功能进行评价,得出混交林综合水源涵养功能最好的结论,本研究通过分析林分欧式贴近度及土壤饱和蓄水量,得出塔尔沟小流域各林型水源涵养能力为混交林>针叶林>落叶阔叶林,与前人结论相似。这可能是由于混交林在土壤层、林冠层、林地蒸散发 3 个层次水源涵养能力最优;针叶林在枯落物层性能最优;而青杨在 4 个层次水源涵养能力均为最差,可能是由于其林下枯落物存量少、土壤结构差;林分结构单一,植被耗水量大,从而减少小流域水量,激化林水矛盾。针叶林虽然枯落物存量较大,但存在林下生物多样性差,林分结构不合理等问题,其水源涵养能力次于混交林。混交林水源涵养能力最优,可能是由于近年对白桦、落叶松、青杨疏林进行补植青海云杉,使得林分的垂直立体结构发育良好,林分郁闭度提高,草本盖度和多度提升,改善森林耗水策略,增加小流域内产水量,从而提高了混交林的水源涵养能力。因此,在今后的造林营林中可以对于水源涵养效益较低的青杨林进行补植白桦林,改善林分结构。

5 结论

干旱区不同林型林地蒸散发量的差异体现着森林耗水及干旱状况的变化。研究结果表明混交林林地蒸散发量较小,水源涵养能力较好;针叶林地耗水较多,水源涵养能力一般;落叶阔叶林地耗水严重,水源涵养能力较差。受干旱胁迫影响较小的林分类型,林分结构更为适宜,森林生长良好、水源涵养能力较好。鉴于水源涵养能力评价中各指标的不确定性、复杂性和模糊性,研究采用熵权法对指标进行客观赋权,相较于前人在北川河流域使用层次分析法评估水源涵养能力更加客观。欧式贴近度的大小顺序为白桦×青杨混交林(0.794)>云杉×青杨混交林(0.723)>云杉×落叶松混交林(0.655)>云杉纯林(0.494)>落叶松纯林(0.416)>青杨纯林(0.270)。欧式贴近度越大,该林分类型水源涵养能力更强。6 种林型中,白桦×青杨混交林水源涵养能力最强,青杨林水源涵养能力最差。不同林型饱和土壤蓄水量大小排序为:白桦×青杨混交林>云杉×青杨混交林>云杉×落叶松混交林>云杉纯林>落叶松纯林>青杨纯林,土壤饱和蓄水量与欧式贴近度值呈极显著正相关($P<0.01$)。

参考文献(References):

- [1] 张特,刘冀,董晓华,王海军,孙周亮,谈新,程雄. 基于 MOD16 的渭河流域蒸散发时空分布特征. 灌溉排水学报, 2018, 37(08): 121-128.
- [2] 卜贤盼, 纠凤凤, 王锋堂, 陈才志, 杨福孙. 五唇兰对 PEG 模拟的干旱胁迫响应研究. 热带亚热带植物学报, 2020, 28(01): 53-61.
- [3] 李娜. 落叶松幼苗对干旱胁迫及氮添加的生理生态响应. 东北林业大学, 2014.
- [4] 吴显芝. 模拟干旱胁迫对喀斯特森林喜钙树种伞花木生理特征的影响. 中国水土保持, 2012(05): 33-35.
- [5] 石松林, 靳甜甜, 刘国华, 王东波, 王景升, 李魁. 气候变暖抑制西藏拉萨河大果圆柏树木生长. 生态学报, 2018, 38(24): 8964-8972.
- [6] 韩金生, 赵慧颖, 朱良军, 张远东, 李宗善, 王晓春. 小兴安岭蒙古栎和黄菠萝径向生长对气候变化的响应比较. 应用生态学报, 2019, 30(07): 2218-2230.
- [7] 赵学鹏, 白学平, 李俊霞, 王丽丽, 张先亮, 陆旭, 陈振举. 气候变暖背景下不同海拔长白落叶松对气候变化的响应. 生态学杂志, 2019, 38(03): 637-647.
- [8] 宋飘, 张乃莉, 马克平, 郭继勋. 全球气候变暖对凋落物分解的影响. 生态学报, 2014, 34(06): 1327-1339.
- [9] 李传林, 朱江. 气候变化对森林的危害——以干旱为例. 水土保持应用技术, 2014(03): 31-33.
- [10] 杜际增, 崔保山, 隋皓辰. 气候变化背景下青藏高原核心区植被变化的时空特征. 环境生态学, 2019, 1(08): 10—20.
- [11] 顾先丽, 吴志伟, 张宇婧, 闫赛佳, 付婧婧, 杜林翰. 气候变化背景下江西省林火空间预测. 生态学报, 2020, 40(02): 667-677.
- [12] 高成德, 余新晓. 水源涵养林研究综述. 北京林业大学学报, 2000(05): 78-82.
- [13] 吕一河, 胡健, 孙飞翔, 张立伟. 水源涵养与水文调节: 和而不同的陆地生态系统水文服务. 生态学报, 2015, 35(15): 5191-5196.
- [14] 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(05): 1679-1686.
- [15] 闵庆文, 袁嘉祖. 森林对于降水的可能影响: 几种分析方法所得结果的比较. 自然资源学报, 2001(05): 467-473.
- [16] 魏晓华, 李文华, 周国逸, 刘世荣, 孙阁. 森林与径流关系——一致性和复杂性. 自然资源学报, 2005(05): 761-770.

- [17] 丁程锋, 张绘芳, 李霞, 李伟涛, 高亚琪. 天山中部云杉天然林水源涵养功能定量评估——以乌鲁木齐河流域为例. 生态学报, 2017, 37(11): 3733-3743.
- [18] 刘璐璐, 曹巍, 贺添, 吴丹, 江华. 南北盘江流域土壤侵蚀时空动态变化及影响因素分析. 中国水土保持科学, 2019, 17(06): 69-77.
- [19] 马国飞, 满苏尔·沙比提. 托木尔峰自然保护区台兰河上游森林植被水源涵养功能. 水土保持学报, 2017, 31(03): 147-153.
- [20] 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. 水土保持学报, 2019, 33(06): 205-212.
- [21] 曹云生, 赵艳玲. 不同灌木林分枯落物层与土壤层水源涵养能力研究. 水土保持研究, 2019, 26(06): 179-183.
- [22] 黄乾, 杨海龙, 朱柱, 赵嘉玮. 青海云杉造林密度与水源涵养功能的响应关系. 水土保持学报, 2019, 33(04): 279-286.
- [23] 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(01): 89-97.
- [24] 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(05): 94-102.
- [25] 张丽娜, 许丽, 秦儒, 史芮嘉, 杨宇平. 基于模糊物元模型的3种灌木林水源涵养能力评价——以内蒙古黑岱沟露天煤矿排土场为例. 中国水土保持科学, 2019, 17(01): 31-38.
- [26] 王宁, 毕华兴, 郭孟霞, 孔凌霄, 侯贵荣, 常译方. 晋西黄土残源沟壑区刺槐人工林土壤水分植被承载力研究. 水土保持学报, 2019, 33(06): 213-219.
- [27] 陈军, 赵仁亮, 乔朝飞. 基于 Voronoi 图的 GIS 空间分析研究. 武汉大学学报: 信息科学版, 2003(S1): 32-37.
- [28] 杜燕, 罗梅, 冯陆春, 孟伟. 基于 Voronoi 图的落叶松人工林空间结构研究. 内蒙古林业调查设计, 2019, 42(06): 70-75.
- [29] 于亦彤, 王新杰, 刘丽, 和敬渊, 杨英军. 基于 Voronoi 图的不同择伐强度下云冷杉林结构分析. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2019, 47(09): 69-78+89.
- [30] 郝月兰, 张会儒, 唐守正. Voronoi 图方法确定云冷杉林最近邻木的适用性研究. 林业资源管理, 2011(06): 59-64.
- [31] 冯星, 孙东永, 胡维登, 张彤, 郭建青. 模糊物元理论在干旱分析中的应用研究. 水文, 2018, 38(06): 18-23.
- [32] 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(02): 264-271.
- [33] 杨良辰, 张楠. 沿坝地区3种混交林枯落物层与土壤层水源涵养能力. 水土保持研究, 2019, 26(03): 253-258.
- [34] 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(08): 105-114.
- [35] 杨霞, 陈丽华, 康影丽, 弓文艳, 郑学良. 辽东低山区5种典型水源涵养林枯落物持水特性. 生态学杂志, 2019, 38(09): 2662-2670.
- [36] 乌都. 清水河县公益林不同林分涵养水源功能研究. 内蒙古农业大学, 2019.
- [37] 蒋翼, 周忠发, 张勇荣, 李丹丹. 喀斯特山区蒸散发的时空变异特征分析——以贵州省为例. 水利水电技术, 2019, 50(09): 53-61.