广西壮族自治区的台湾桤木混交造林水源涵养功能评价

彭玉华，郑 威，谭长强，何琴飞，申文辉，曹艳云，郝海坤，黄志玲，何 峰

（广西壮族自治区林业科学研究院，广西 南宁 530002）

摘 要：[目的] 研究台湾桤木混交造林的枯落物层和土壤层的水源涵养能力，为台湾桤木在广西壮族自治区的合理经营与利用提供理论依据。[方法] 采用熵权法对台湾桤木×马尾松、台湾桤木×巨尾桉、台湾桤木×红锥及台湾桤木纯林的林分枯落物层和土壤层的水文效应相关因子进行综合评价。[结果] ①枯落物最大持水量最大是台湾桤木×红锥(2∶1)，台湾桤木×马尾松(1∶1)最少；台湾桤木×红锥(1∶2)的枯落物有效拦蓄率最大，台湾桤木×红锥(2∶1)的枯落物有效拦蓄量最大，台湾桤木×巨尾桉(2∶1)的枯落物有效拦蓄率和有效拦蓄量均最小。②台湾桤木混交林土壤容重均明显低于台湾桤木纯林，土壤总孔隙度、毛管孔隙度、自然含水率、最大持水量和毛管持水量均是台湾桤木混交林大于台湾桤木纯林。③采用熵权法计算权重值占比例最大是枯落物最大持水量，最少是土壤毛管孔隙度；台湾桤木不同混交造林模式水源涵养能力综合评价排序为：台湾桤木×巨尾桉(1∶2)＞台湾桤木×红锥(2∶1)＞台湾桤木×马尾松(1∶2)＞台湾桤木×红锥(1∶1)＞台湾桤木×巨尾桉(1∶1)＞台湾桤木×马尾松(2∶1)＞台湾桤木×红锥(1∶2)＞台湾桤木×巨尾桉(2∶1)＞台湾桤木×马尾松(1∶1)＞台湾桤木纯林。[结论] 台湾桤木与马尾松、巨尾桉和红锥混交造林的水源涵养能力均优于台湾桤木纯林。

关键词：台湾桤木；混交造林；枯落物层；土壤层；水源涵养

文献标识码：A **文章编号**：1000-288X(2019)05-0098-08 **中图分类号**：S726.2，S727.21

文献参数：彭玉华，郑威，谭长强，等.广西壮族自治区的台湾桤木混交造林水源涵养功能评价[J].水土保持通报，2019，39(5)：98-105. DOI：10.13961/j.cnki.stbctb.2019.05.014；Peng Yuhua，Zheng Wei，Tan Changqiang，et al. Evaluation of water conservation function of *Alnus formosana* mixed plantations in Guangxi Zhuang Autonomous Region[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation，2019，39(5)：98-105.

Evaluation of Water Conservation Function of *Alnus Formosana* Mixed Plantations in Guangxi Zhuang Autonomous Region

Peng Yuhua，Zheng Wei，Tan Changqiang，He Qinfei，
Shen Wenhui，Cao Yanyun，Hao Haikun，Huang Zhiling，He Feng

（*Guangxi Forestry Research Institute*，*Nanning*，*Guangxi* 530002，*China*）

Abstract：[Objective] The water conservation ability of the litter and soil layers of *Alnus formosana* mixed plantations was studied in order to provide a theoretical basis for the rational management and utilization of *A. formosana* in the Guangxi Zhuang Autonomous Region. [Methods] The entropy weight method was used to comprehensively evaluate the hydrological effect related factors. The mixed modes included *A. formosana* and *Pinus massoniana*，*A. formosana* and *Eucalyptus grandis* × *urophylla*，*A. formosana* and *Castanopsis hystrix*，and an *A. formosana* pure plantation as the control. [Results] ① The maximum water holding capacities of litter were largest in the mixed *A. formosana* and *C. hystrix* plantation with a 2∶1 ratio and least in the mixed *A. formosana* and *P. massoniana* plantation with a 1∶1 ratio. The effective retention rate of litter in the mixed *A. formosana* and *C. hystrix* plantation (with a 1∶2 ratio) was the highest，the effective retention amount in the mixed *A. formosana* and *C. hystrix* plantation (with a 2∶1 ratio) was the

收稿日期：2019-04-24 **修回日期**：2019-05-10

资助项目：广西林业科技项目“台湾桤木优树子代区域试验研究”(桂林科字[2016]8号；广西科技计划项目“台湾桤木种质创新与可持续经营关键技术研究”(桂科 AB16380127)；广西林业科技项目“台湾桤木混交造林与立地维持技术示范”(gl2017kt10)。

第一作者：彭玉华(1963—)，女(汉族)，广西省横县人，高级工程师，主要从事森林生态和森林栽培研究。E-mail：pyh112233456789@126.com。

通讯作者：申文辉(1972—)，男(汉族)，湖南省安乡人，教授级工程师，博士，主要从事森林培育研究。E-mail：shenwenhui2003@163.com。

highest, whilst the effective retention rate and amount in the mixed *A. formosana* and *E. grandis*× *urophylla plantation* (2∶1) were the lowest. ② The soil bulk density in the mixed plantations was significantly lower than that in the pure forest, however, the total porosity, capillary porosity, natural water content, maximum water holding capacity, and capillary water holding capacity of the soil were all higher in the mixed plantations. ③ The entropy weight method was used to calculate the weight value. The maximum water holding capacity of the litter was the largest, and the soil capillary porosity was the smallest. The comprehensive evaluation of the water conservation ability was ranked as follows: *A. formosana* and *E. grandis* × *urophylla* (1∶2) > *A. formosana* and *C. hystrix* (2∶1) > *A. formosana* and *P. massoniana* (1∶2) > *A. formosana* and *C. hystrix* (1∶1) > *A. formosana* and *E. grandis* × *urophylla* (1∶1) > *A. formosana* and *P. massoniana* (2∶1) > *A. formosana* and *C. hystrix* (1∶2) > *A. formosana* and *E. grandis* × *urophylla* (2∶1) > *A. formosana* and *P. massoniana* (1∶1) > CK. [Conclusion] The water conservation ability of the mixed plantations of *A. formosana* was better than that of the pure plantation.

Keywords: *Alnus formosana*; mixed plantations; litter layer; soil layer; water conservation

森林作为陆地生态系统的主体,其很重要的服务功能是水源涵养、保持水土,主要体现在林冠层、枯落物层和土壤层等对降水进行再分配的过程上[1-2]。枯落物层和土壤层是森林生态系统固有的组成结构,是实现森林水源涵养和水土保持功能的重要部分[3-4],对森林的水源涵养和保持水土起着决定性影响,其中枯落物层是森林水源涵养功能的主要层次,土壤层的水分贮存和渗透是反映森林水文效应的重要参数[5-7]。大量研究表明,不同的森林类型、树种组成、密度,群落结构差异较大,其水源涵养和保持水土功能存在差异[8-13],这种差异是评价不同森林类型水源涵养功能的一个重要的特征,也是区域内生态系统功能评价和维护的重要依据[14]。

台湾桤木(*Alnus formosana*)不仅速生,且具有培肥土壤、保持地力的作用,是中国南方改善林木树种结构、建设生态林业的一个优良速生阔叶树种[15]。因此,广西壮族自治区在 21 世纪 20 年代初引进了台湾桤木作为与短周期桉树工业原料林、松、杉人工林轮作或混交造林改善地力和防止地力衰退的优良树种,经几年的栽培研究,台湾桤木适应广西的气候,引种栽培成功。为了揭示广西引种台湾桤木混交造林枯落物层和土壤层的水源涵养能力,本文以台湾桤木与巨尾桉、马尾松、红锥混交人工造林为研究对象,从土壤层和枯落物层出发,对不同混交模式林分枯落物的蓄积量、最大持水量、有效拦蓄量和林地土壤容重、孔隙度、持水特征等进行研究和评价,旨在揭示台湾桤木不同混交模式人工造林枯落物和土壤的水源涵养能力,为台湾桤木在广西省的合理经营与利用提供理论依据。

1　研究区概况

试验地位于广西壮族自治区南宁市林科所,地处亚热带季风气候区,107°49′—108°37′E,22°59′—23°33′N;地势平坦,海拔约 100 m;光热充足,≥10 ℃积温为 7 200 ℃,年均气温 21.6 ℃;最热的 7 月份,气温平均为 28.6 ℃,极端最高气温 40.7 ℃;最冷的一月份,平均气温 12.8 ℃;极端最低气温－0.8 ℃;雨量充沛,年降雨量为 1 100～1 700 mm,年均相对湿度为 80%左右,年蒸发量 1 613.8 mm,夏湿冬干,干湿季节明显,全年无霜期高达 360 d,偶有霜雪。土壤类型为第四纪红土发育而成的中壤质厚层赤红壤,土层厚 1 m 以上,pH 值为 4.5～6,肥力中等。

2　研究内容与方法

2.1　试验设计

造林前作物为木薯等农作物。2015 年 3 月,采用田间随机区组试验设计,营造了台湾桤木与马尾松、巨尾桉、红锥不同混交比例的混交试验林,台湾桤木纯林为对照,造林和管理措施采用常规的技术规程,每个处理 3 个重复,每个重复种植 0.20 hm^2。具体见表 1。

表 1　混交树种与混交比例详细情况

处理	混交树种	混交比例	处理	混交树种	混交比例
1	台湾桤木∶马尾松	1∶2	6	台湾桤木∶巨尾桉	1∶1
2	台湾桤木∶马尾松	2∶1	7	台湾桤木∶红锥	1∶2
3	台湾桤木∶马尾松	1∶1	8	台湾桤木∶红锥	2∶1
4	台湾桤木∶巨尾桉	1∶2	9	台湾桤木∶红锥	1∶1
5	台湾桤木∶巨尾桉	2∶1	CK	台湾桤木纯林	—

2.2 枯落物调查及测定方法

2.2.1 枯落物样品采集 于 2019 年 2 月底,在每个处理每个重复内,按 S 形设置 5 个 50 cm×50 cm 收集点收集凋落物,按未分解、半分解标准收集全部凋落物,称其自然状态下的质量。

2.2.2 测定方法 将所收集凋落物拌匀后按 4 分法取约 600 g 样品带回实验室,称其自然状态质量,在 80 ℃下烘至恒定质量,称其干质量。采用室内浸泡法对不同林分的枯落物持水特性进行测定。将烘干后的枯落物取部分称量装入网袋,并浸入盛有清水容器中浸泡 24 h,捞起并放置至枯落物不滴水时称质量,计算其最大持水率、最大持水量、有效持水量等。每个样品 3 次重复。

枯落物自然含水率 $R_o=(G_o-G_d)/G_d\times100\%$ (1)

枯落物最大持水率 $R_{max}=(G_{24}-G_d)/G_d\times100\%$ (2)

枯落物最大持水量 $W_{max}=R_{max}\times M$ (3)

枯落物有效拦蓄率 $R_{amax}=0.85\times R_{max}-R_o$ (4)

枯落物有效拦蓄量 $W_{amax}=R_{amax}\times M$ (5)

式中:G_o,G_d,G_{24}——枯落物自然状态下质量、枯落物烘干质量及浸水 24 h 后质量(g);M——凋落物蓄积量(t/hm^2),0.85 为有效拦蓄调整系数[1,5,12]。

2.3 土壤调查

2.3.1 样品采集 于 2019 年 2 月底,采用环刀取样分析法,在每个处理每个重复内,纯林在行间正中、混交林在两个树种行间正中挖取 1 个土壤剖面,按 0—20 cm,20—40 cm 分层采样,每层在每个剖面分左、中、右采集环刀、铝盒土样,供实验室分析使用。

2.3.2 测定方法 土壤持水性状、物理性状具体的测定及计算方法参照林业行业标准《森林土壤水分—物理性质的测定》(LY/T 1215-1999):

$$自然含水率(100\%)=\frac{m_{湿}-m_{干}}{m_{干}}\times100\% \quad (6)$$

$$土壤容重(mg/m^3)=\frac{M_{干}}{V} \quad (7)$$

$$最大持水量(g/kg)=\frac{M_{24}-M_{干}}{M_{干}}\times100\% \quad (8)$$

$$毛管持水量(g/kg)=\frac{M_{砂干}-M_{干}}{M_{干}}\times100\% \quad (9)$$

$$毛管孔隙度(体积\%)=\frac{0.1\times毛管持水量\times土壤容重}{水的密度} \quad (10)$$

$$非毛管孔隙度(体积\%)=\frac{0.1\times(最大持水量-毛管持水量)\times土壤容重}{水的密度} \quad (11)$$

总孔隙度(体积%)=毛管孔隙度+非毛管孔隙度 (12)

式中:$m_{干}$——铝盒内烘干土质量(g);$m_{湿}$——铝盒内湿土质量(g);$M_{干}$——环刀内干质量(g);M_{24}——浸水 24 h 后环刀内湿质量(g);$M_{砂干}$——在干砂上搁置 2 h 后环刀内湿质量(g);V——环刀体积(m^3)。

2.4 水源涵养综合评价

利用熵权法对不同林分各因子进行量化,在一个标准系统下对不同林分类型的水源涵养能力进行综合评价。步骤如下:

(1) 将各个指标的数据进行标准化处理

公式为:$Y_{ij}=\frac{x_{ij}-\min(x_i)}{\max(x_i)-\min(x_i)}$ (13)

($i=1,2,\cdots,m$;$j=1,2,\cdots,n$;正向指标:枯落物蓄积量、最大持水量、有效拦蓄量、总孔隙度、毛管孔隙度、非毛管孔隙度、毛管持水量、最大持水量)

或:$Y_{ij}=\frac{\max(x_i)-x_{ij}}{\max(x_i)-\min(x_i)}$ (14)

($i=1,2,\cdots,m$;$j=1,2,\cdots,n$;反向指标:土壤容重)

式中:i——林分类型数;j——同组指标数;Y_{ij}——不同林分各指标数据标准化后的值;X_{ij}——不同林分各指标数据值;$\min(X_i)$——不同林分同一指标中最小的数据值;$\max(X_i)$——不同林分同一指标中最大的数据值。

(2) 求不同林分各指标的信息熵。根据信息论中信息熵的定义,一组数据的信息熵 E_j 计算如下。

$$E_j=-\ln(m)^{-1}\sum_{i=1}^{m}P_{ij}\ln P_{ij} \quad (15)$$

式中:E_j——熵值,$P_{ij}=Y_{ij}/\sum_{i=1}^{m}Y_{ij}$,如果 $P_{ij}=0$,则定义 $\lim_{P_{ij}-0}P_{ij}\ln P_{ij}=0$。

(3) 通过信息熵计算各指标的权重 W_j。

$$W_j=\frac{1-E_j}{n-\sum_{j=1}^{n}E_j}\quad(j=1,2,\cdots,n) \quad (16)$$

(4) 综合评价。根据计算出的指标权重,计算不同林分类型的综合评价得分,公式为。

$$Z_i=\sum_{j=1}^{n}100\times P_{ij}W_j \quad (17)$$

2.5 数据分析方法

数据运用 Excel 2010 及 SPSS19.0 软件进行处理与分析。

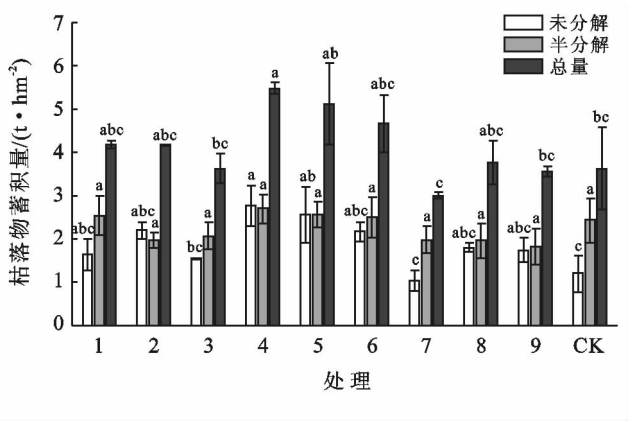
3 结果与分析

3.1 枯落物蓄积量及水文效应

3.1.1 枯落物蓄积量 枯落物是森林生态系统物质循环和能量流动的重要环节,其蓄积量多少是由林分所处的气候和地形状况、累积年限、林分物种构成、植物发育状况、人为活动、凋落物特性和分解状况等很多因素共同决定的[6,16]。由图 1 可以看出,台湾桤木

不同混交造林的枯落物蓄积量有一定差异,其变动范围为 3.01～5.48 t/hm^2,其中处理 4 的总枯落物蓄积量最大,明显高于处理 3,7,9 和 CK,其次是处理 5,最少是处理 7,处理 4 和处理 5 与台湾桤木混交的树种均是尾巨桉。不同的混交处理未分解和半分解枯落物蓄积量所占比例不同,处理 4,5 和处理 2 的未分解枯落物大于半分解枯落物,以处理 2 占比最大;在未分解枯落物和半分解枯落物中,蓄积量最大均是处理 4,其次是处理 5,未分解枯落物最少是处理 7,而半分解枯落物最少是处理 9。由此可见,不同林分组成枯落物蓄积量存在差异。

3.1.2　*枯落物持水能力*　森林凋落物持水能力用最大持水率和最大持水量来表示,它的大小取决于林分类型、累积状况、凋落物组成、分解状况等因素[17]。由表 2 可知,台湾桤木不同混交造林的持水能力有差异,且未分解枯落物的最大持水率差异达显著。枯落物最大持水率的变动范围为 178.70%～266.07%,排序为:处理 7>处理 8>CK>处理 9>处理 3>处理 2>处理 6>处理 1>处理 4>处理 5,台湾桤木与红锥混交造林的处理 7、处理 8、处理 9 枯落物持水率均排在前面。枯落物最大持水量的变动范围为 6.91～9.23 t/hm^2,最大的是处理 8,其次是处理 1 和处理 4,最少是处理 3,排序为:处理 8>处理 1>处理 4>处理 9>CK>处理 6>处理 2>处理 7>处理 5>处理 3。同一处理在最大持水率和最大持水量的排序中呈现出不同的规律,这是因为最大持水量还与枯落物本身的蓄积量有关,枯落物蓄积量又与其分解程度有关。



注:不同字母则表示在 $\alpha=0.05$ 显著水平时该组数据之间的差异显著。处理 1—7 详见表 1。下同。

图 1　台湾桤木不同混交造林枯落物蓄积量

表 2　台湾桤木不同混交造林枯落物持水能力

处理	最大持水率/%			最大持水量/(t·hm^{-2})		最大持水总量/(t·hm^{-2})
	未分解层	半分解层	平均	未分解层	半分解层	
1	246.46±6.35^{abc}	185.91±4.13	216.19	4.06±1.02	4.71±0.74	8.77±0.03
2	236.13±4.88^{abc}	215.03±21.33	225.58	4.35±0.77	3.27±0.54	7.62±1.25
3	244.20±14.48^{abc}	207.76±12.31	225.98	3.37±0.25	3.54±0.63	6.91±0.88
4	204.19±10.43^{bc}	194.03±24.66	199.11	4.63±1.50	4.11±0.47	8.74±1.82
5	163.12±24.77^{c}	194.28±35.69	178.70	3.44±1.18	3.67±0.57	7.11±1.71
6	237.17±36.30^{abc}	199.98±57.81	218.58	4.01±0.91	3.64±1.15	7.65±2.00
7	297.68±16.39^{a}	234.47±21.54	266.07	2.77±0.61	4.63±0.10	7.40±0.60
8	314.21±63.81^{a}	184.05±29.04	249.13	5.74±1.48	3.49±0.17	9.23±1.92
9	237.51±11.66^{abc}	222.90±26.09	230.20	4.16±0.41	3.90±0.54	8.06±0.23
ck	271.94±46.19^{ab}	193.57±19.89	232.76	3.77±1.22	4.08±1.03	7.85±2.45
F	2.461	0.290		0.586	0.437	0.242
sig.	0.050	0.969		0.792	0.897	0.983

注:数值均为平均值±标准误;不同字母则表示在 $\alpha=0.05$ 显著水平时该组数据之间的差异显著。处理 1—7 详见表 1。下同。

3.1.3　*枯落物拦蓄能力*　凋落物的有效拦蓄量是评价凋落物对降雨拦蓄能力的重要指标之一[18]。由于人工模拟降雨与自然降雨存在一定的差异,浸泡法只能反映枯落物理想状态下的持水能力,枯落物的最大持水率和最大持水量只代表枯落物试样浸泡水 24 h 后的测定结果,而在实际林地上很少会出现一场连续 24 h 的降雨,因此枯落物的最大持水率和最大持水量不代表枯落物对降雨的截留量,只能反映枯落物层持水能力大小,对于一次降水拦蓄的能力,采用枯落物有效拦蓄率和有效拦蓄量才是反映了枯落物的实际降水拦蓄能力,是判断枯落物对降水拦蓄的真实指标[5]。由表 3 可知,不同的混交处理枯落物拦蓄能力有一定的差异,且未分解枯落物的有效拦蓄率差异显著。枯落物有效拦蓄率的变动范围为 109.85%～186.35%,排序为:处理 7>处理 8>处理 3>CK>处理 9>处理 2>处理 6>处理 1>处理 4>处理 5,排在前面的 2 个处理均是台湾桤木与红锥混交造林。由于有效拦蓄量与枯落物蓄积量紧密相关,其与有效拦蓄率变化不一致,最大的是处理 8,其次是处理 4,最少是处理 5,其变动范围为 4.46～6.09 t/hm^2,排序为:处理 8>处理 4>处理 1>CK>处理 9>处理 7>处理 6>处理 2>处理 3>处理 5。

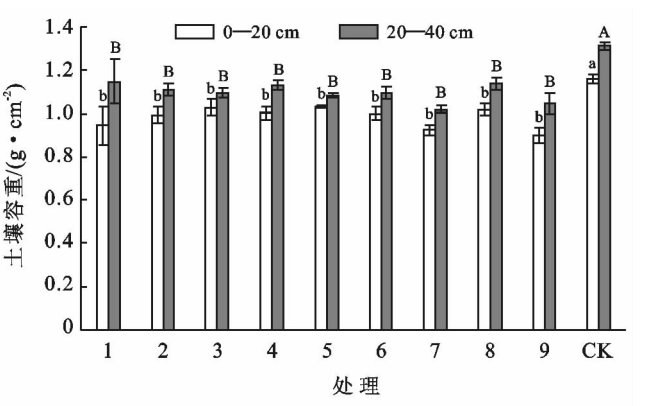
表 3 台湾桤木不同混交造林枯落物拦蓄能力

处理	有效拦蓄率/%			有效拦蓄量/(t·hm^{-2})			有效拦蓄深/mm
	未分解层	半分解层	平均	未分解层	半分解层	总量	
1	169.53±0.75^{abc}	113.40±3.24	141.46±1.20^{ab}	2.77±0.61	2.90±0.60	5.67±0.01	0.57±0.00
2	156.87±6.71^{abc}	141.08±22.70	148.98±14.06^{ab}	2.87±0.46	2.09±0.29	4.96±0.70	0.50±0.07
3	184.74±19.71^{ab}	132.09±2.56	158.42±9.08^{ab}	2.52±0.08	2.30±0.50	4.81±0.57	0.48±0.06
4	142.14±6.22^{bc}	126.15±21.33	134.15±8.47^{ab}	3.22±1.02	2.63±0.24	5.85±1.14	0.59±0.11
5	103.52±12.109^{c}	116.19±16.44	109.85±12.44^{b}	2.22±0.78	2.24±0.39	4.46±1.15	0.45±0.12
6	166.87±25.59^{abc}	120.13±43.60	143.51±34.32^{ab}	2.90±0.77	2.13±0.86	5.04±1.54	0.50±0.15
7	220.04±5.51^{a}	152.66±8.48	186.35±2.38^{a}	2.03±0.41	3.05±0.27	5.08±0.14	0.51±0.01
8	226.23±50.53^{a}	106.38±31.87	166.31±9.33^{ab}	4.14±1.15	1.95±0.20	6.09±0.95	0.61±0.10
9	160.99±10.16^{abc}	139.93±21.42	150.46±7.72^{ab}	2.84±0.39	2.43±0.35	5.27±0.23	0.53±0.02
CK	177.14±44.20^{abc}	128.30±23.42	152.72±32.94^{ab}	2.55±0.98	2.79±0.99	5.34±1.94	0.53±0.19
F	2.452	0.348	1.228	0.564	0.424	0.192	0.192
sig.	0.050	0.946	0.338	0.808	0.905	0.992	0.992

3.2 土壤层的水文效应

3.2.1 *土壤层的物理特征* 土壤容重是土壤质地的一个重要参数，它受到林分土壤发育状况的影响，反映土壤通透性和根系延展阻力的大小，关系到森林土壤持水能力[17-18]。由图 2 可知，无论在 0—20 cm，还是 20—40 cm 土层，台湾桤木混交林土壤容重均明显低于台湾桤木纯林，表明混交林在改善土壤孔隙结构方面具有较好的作用。无论是台湾桤木混交林还是台湾桤木纯林均是 20—40 cm 土层的土壤容重大于 0—20 cm 土层。处理 7 在 0—20 cm 土层和 20—40 cm 土层的土壤容重均是最小。

从表 4 可见，土壤总孔隙度、毛管孔隙度和非毛管孔隙度在不同台湾桤木混交造林中除了 0—20 cm 土层的非毛管孔隙度外的均有明显的差异。无论在 0—20 cm，还是 20—40 cm 土层，台湾桤木混交林的总孔隙度和毛管孔隙度均大于台湾桤木纯林。在 0—20 cm 土层，总孔隙度最大是处理 9，而 20—40 cm 土层最大的是处理 2；整体看，处理 2，处理 3，处理 4，处理 6，处理 7，处理 8 和 CK 的土壤总孔隙度均随土层的增加而增加，而处理 1，处理 5 和处理 9 的土壤总孔隙度均随着土层的增加而降低。



注：不同小写字母表示 0—20 cm 土层、不同大写字母表示 20—40 cm 土层存在显著差异($p<0.05$)。下同。

图 2 台湾桤木不同混交林造林土壤容重特征

表 4 台湾桤木不同混交造林土壤孔隙度 %

处理	0—20 cm 土层			20—40 cm 土层		
	总孔隙度	毛管孔隙度	非毛管孔隙度	总孔隙度	毛管孔隙度	非毛管孔隙度
1	63.27±0.88^{ab}	60.89±0.99^{a}	2.39±0.67^{b}	61.57±1.08^{a}	60.86±0.99^{a}	0.70±0.16^{d}
2	61.42±1.20^{ab}	58.55±1.18^{a}	2.87±0.63^{ab}	65.00±1.55^{a}	62.40±1.74^{a}	2.60±0.47^{abc}
3	62.47±1.01^{ab}	59.72±1.34^{a}	2.75±0.78^{ab}	63.58±0.36^{a}	62.31±0.38^{a}	1.27±0.36^{cd}
4	59.26±0.82^{b}	56.28±1.30^{a}	2.98±0.56^{ab}	59.82±0.93^{ab}	57.53±1.16^{a}	2.29±0.38^{abc}
5	62.01±2.02^{ab}	58.41±2.11^{a}	3.60±0.90^{ab}	60.78±1.36^{a}	59.04±1.27^{a}	1.74±0.28^{bcd}
6	59.26±1.30^{b}	55.38±1.49^{a}	3.88±0.81^{ab}	61.71±0.52^{a}	59.84±0.87^{a}	1.87±0.60^{bcd}
7	62.04±0.52^{ab}	58.03±1.19^{a}	4.01±1.01^{ab}	63.55±0.88^{a}	60.51±0.78^{a}	3.04±0.54^{ab}
8	59.33±1.37^{b}	55.31±1.63^{a}	4.01±0.90^{ab}	59.82±1.20^{ab}	58.22±0.90^{a}	1.61±0.70^{bcd}
9	65.75±1.39^{a}	60.27±1.45^{a}	5.48±1.18^{a}	61.19±0.68^{a}	59.80±0.65^{a}	1.38±0.30^{cd}
CK	50.43±2.78^{c}	46.46±3.39^{b}	3.97±0.84^{ab}	55.02±4.13^{b}	51.47±4.31^{b}	3.56±0.63^{a}
F	7.878	5.771	1.142	2.823	3.398	3.367
sig.	0.000	0.000	0.344	0.006	0.001	0.001

土壤毛管孔隙度越大，土壤持蓄水能力越强。土壤非毛管孔隙是土壤重力水移动的主要通道，与土壤蓄渗水能力更为密切。在 0—20 cm 土层，处理 1 的毛管孔隙度最大，而在 20—40 cm 土层毛管孔隙度最

大的是处理 2;处理 9 在 0—20 cm 土层的非毛管孔隙度最大,CK 在 20—40 cm 土层非毛管孔隙度最大。

3.2.2　土壤层的持水特征　土壤持水特性直接反映土壤蓄水保水能力强弱,土壤持水特性越好,土壤保蓄水分的能力就越强[14,19-20]。从图 3 可以看出,不同台湾桤木混交造林的持水能力有明显的差异。无论是 0—20 cm 土层还是 20—40 cm 土层台湾桤木混交林的土壤自然含水率、最大持水量和毛管持水量均高于台湾桤木纯林;各处理均是 20—40 cm 土层的自然含水率大于 0—20 cm 土层,而各处理的毛管持水量和最大持水量均是 0—20 cm 土层大于 20—40 cm 土层;在 0—20 cm 土层自然含水率、最大持水量、毛管持水量均是处理 9 最大;在 20—40 cm 土层处理 7 的最大持水量和毛管持水量最大,处理 9 的自然含水率最大。

3.3　水源涵养能力综合评价

3.3.1　台湾桤木不同混交造林水源涵养能力综合评价指标　为了能够将枯落物层和土壤层的水文效应更加直观地进行比较评价,利用熵权法对台湾桤木不同混交造林的水源涵养能力进行综合评价,信息熵的概念源于热力学,是对系统状态不确定性的一种度量,通过熵值法得到各个指标的信息熵,一般来说,若某个指标的信息熵越小,表明指标值的变异程度越大,提供的信息量越多,在综合评价中所能起到的作用也越大,其权重也就越大。相反,某个指标的信息熵越大,表明指标值的变异程度越小,提供的信息量也越少,在综合评价中所起到的作用也越小,其权重也就越小[1]。

本研究选择枯落物层水文效应 3 个指标(枯落物蓄积量、最大持水量、有效拦蓄量,3 个指标均取总量);选择土壤层 6 个指标(土壤容重、总孔隙度、毛管孔隙度、非毛管孔隙度、毛管持水量、最大持水量,其中土壤容重、总孔隙度、毛管孔隙度、非毛管孔隙度 4 个指标均取 0—20 cm 土层和 20—40 cm 土层的平均值,毛管持水量、最大持水量 2 个指标均取 0—20 cm 土层和 20—40 cm 土层的和)。台湾桤木不同造林水源涵养能力 9 个评价指标数据见表 5。将台湾桤木不同造林水源涵养能力 9 个评价指标数据进行标准化处理,结果见表 6。

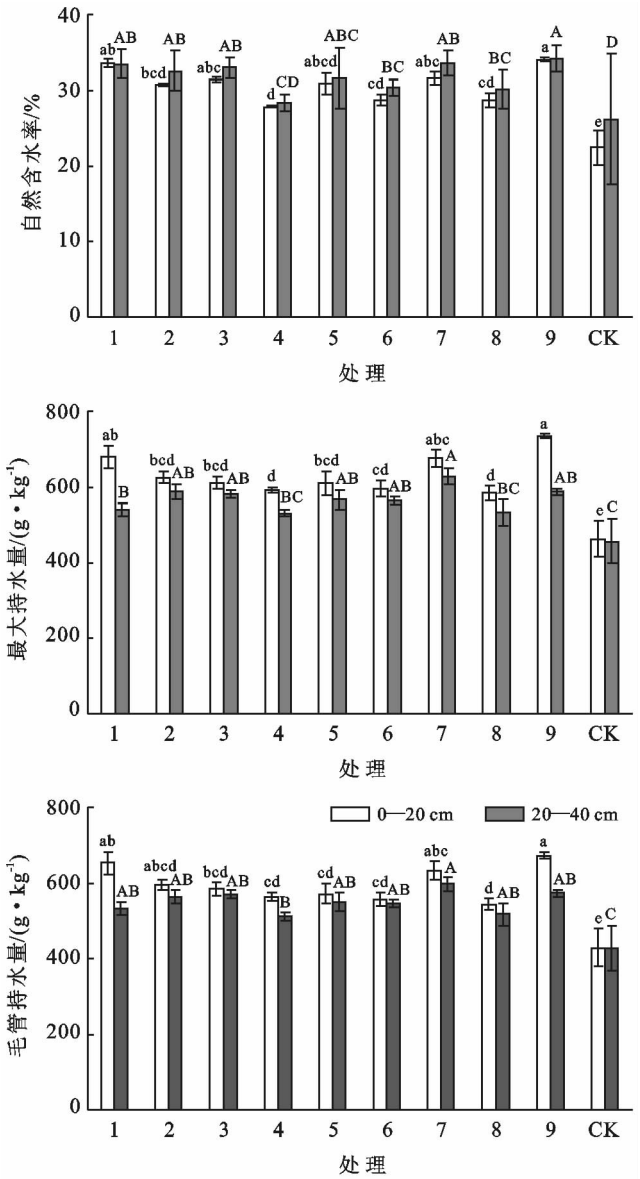


图 3　台湾桤木不同混交造林土壤持水特征

表 5　台湾桤木不同造林水源涵养能力评价指标

处理	枯落物层			土壤层					
	枯落物蓄积量/(t·hm⁻²)	最大持水量/(t·hm⁻²)	有效拦蓄量/(t·hm⁻²)	土壤容重/(g·cm⁻³)	总孔隙度/%	毛管孔隙度/%	非毛管孔隙度/%	毛管持水量/(g·kg⁻¹)	最大持水量/(g·kg⁻¹)
1	4.18	8.77	5.67	1.05	62.42	60.87	1.54	1 185.96	1 218.47
2	4.16	7.62	4.96	1.05	63.21	60.48	2.74	1 158.65	1 212.03
3	3.62	6.91	4.81	1.06	63.02	61.01	2.01	1 153.55	1 192.62
4	5.48	8.74	5.85	1.06	59.54	56.90	2.63	1 071.73	1 121.94
5	5.12	7.11	4.46	1.06	61.40	58.73	2.67	1 121.27	1 174.56
6	4.66	7.65	5.04	1.05	60.49	57.61	2.87	1 102.53	1 159.95
7	3.01	7.40	5.08	0.97	62.80	59.27	3.53	1 228.52	1 302.62
8	3.76	9.23	6.09	1.08	59.57	56.77	2.81	1 060.87	1 116.64
9	3.56	8.06	5.27	0.97	63.47	60.03	3.43	1 246.23	1 320.72
CK	3.63	7.85	5.34	1.24	52.73	48.96	3.76	857.23	919.19

3.3.2 构造标准化指标矩阵并计算权重值 经计算得出各指标的信息熵值(见表 7),再根据信息熵值计算得到各指标的权重值(见表 8)。从评价指标权重分布上看,对水源涵养有重要影响的指标是枯落物最大持水量、枯落物蓄积量和枯落物有效拦蓄量,它们的权重值分别占到 18.6%,15.9%,13.8%,权重值排序为:枯落物最大持水量>枯落物蓄积量>枯落物有效拦蓄量>土壤非毛管孔隙度>土壤最大持水量>土壤毛管持水量>土壤容重>土壤总孔隙度>土壤毛管孔隙度。

表 6 各指标标准化矩阵

处理	枯落物			土壤层					
	枯落物蓄积量	最大持水量	有效拦蓄量	土壤容重	总孔隙度	毛管孔隙度	非毛管孔隙度	毛管持水量	最大持水量
1	0.47	0.80	0.74	0.70	0.90	0.99	0.00	0.85	0.75
2	0.47	0.31	0.31	0.70	0.98	0.96	0.54	0.77	0.73
3	0.25	0.00	0.21	0.67	0.96	1.00	0.21	0.76	0.68
4	1.00	0.79	0.85	0.67	0.63	0.66	0.49	0.55	0.50
5	0.85	0.09	0.00	0.67	0.81	0.81	0.51	0.68	0.64
6	0.67	0.32	0.36	0.70	0.72	0.72	0.60	0.63	0.60
7	0.00	0.21	0.38	1.00	0.94	0.86	0.90	0.95	0.95
8	0.30	1.00	1.00	0.59	0.64	0.65	0.57	0.52	0.49
9	0.22	0.50	0.50	1.00	1.00	0.92	0.85	1.00	1.00
CK	0.25	0.41	0.54	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00

台湾桤木不同混交造林水源涵养能力综合评价值(见表 9),排序为:处理 4>处理 8>处理 1>处理 9>处理 6>处理 2>处理 7>处理 5>处理 3>CK。从排序中可见,台湾桤木纯林的水源涵养综合评价得分最低,表明台湾桤木与其他树种混交造林的水源涵养能力均优于台湾桤木纯林。

台湾桤木与不同树种混交造林的水源涵养综合评价值的变化没有一定的规律,但混交造林中不同的混交比例对水源涵养综合评价值的影响较大,同是台湾桤木与巨尾桉混交造林,混交比例 1∶2 的处理 4 综合评价值排名第一,而混交比例 2∶1 的处理 5 排名第八;同是台湾桤木与红锥混交造林,混交比例 2∶1的处理 8 综合评价值排名第二,而混交比例 1∶2 的处理 7 排名第七;同是台湾桤木与马尾松混交造林,混交比例 1∶2 的处理 1 综合评价值排名第三,而混交比例 1∶1 的处理 3 排名第九。这与不同的混交比例对种间关系的发展和混交效果影响有关,因此在混交造林中为了达到树种之间合理的生存关系,要根据各树种的地位和作用进行合理的混交分配比例。

表 7 各指标的信息熵值

处理	枯落物			土壤层					
	枯落物蓄积量	最大持水量	有效拦蓄量	土壤容重	总孔隙度	毛管孔隙度	非毛管孔隙度	毛管持水量	最大持水量
信息熵	0.894	0.876	0.908	0.947	0.948	0.949	0.923	0.945	0.942

表 8 各指标的权重值

处理	枯落物			土壤层					
	枯落物蓄积量	最大持水量	有效拦蓄量	土壤容重	总孔隙度	毛管孔隙度	非毛管孔隙度	毛管持水量	最大持水量
权重值	0.159	0.186	0.137	0.079	0.077	0.077	0.115	0.083	0.087

表 9 台湾桤木不同混交造林水源涵养综合评价得分

处理	1	2	3	4	5	6	7	8	9	CK
得分	11.963	9.645	6.557	13.730	8.556	9.816	9.267	12.590	11.737	6.139
排名	3	6	9	1	8	5	7	2	4	10

4 结论

(1) 台湾桤木不同混交造林的枯落物蓄积量有差异,处理 4 的枯落物蓄积量最大,其次是处理 5,最少是处理 7。台湾桤木不同混交造林的持水能力有差异,且未分解枯落物的最大持水率差异达显著;枯落物最大持水率最大是处理 7,其次是处理 8,最小是处理 5;由于枯落物蓄积量有差异,台湾桤木不同混交造林下的枯落物最大持水量与最大持水率的变化不一致,最大的是处理 8,其次是处理 1 和处理 4,最少是处理 3。不同的混交处理枯落物拦蓄能力有一定的差异,且未分解枯落物的有效拦蓄率差异达显著;枯落物有效拦蓄率的变动范围为 109.85%～186.35%,最大的是台湾桤木与红锥混交造林的处理 7 和处理 8,最小的是台湾桤木与巨尾桉混交造林的处理 4 和处理 5;枯落物有效拦蓄量最大的是处理 8,其次是处理 4,最少是处理 5。

(2) 0—20 cm 土层和 20—40 cm 土层土壤容重范围分别为 0.90～1.16,1.02～1.31 g/cm^3,台湾桤木混交林均明显低于台湾桤木纯林;0—20 cm 土层和 20—40 cm 土层总孔隙度最大分别是处理 9(50.43%),处理 2(55.02%),0—20 cm 土层和 20—40 cm 土层毛管孔隙度最大分别是处理 1(60.89%),处理 2(62.40%),土壤总孔隙度、毛管孔隙度均是台湾桤木混交林大于台湾桤木纯林,表明混交林在改善土壤孔隙结构方面具有较好的作用。台湾桤木混交林土壤自然含水率(34.12%)、最大持水量(1 320.72 g/kg)和毛管持水量(1320.72 g/kg)最大的均是处理 9,土壤自然含水率、最大持水量和毛管持水量均是台湾桤木混交林高于台湾桤木纯林,表明台湾桤木混交林的土壤持蓄水能力强于台湾桤木纯林;土壤非毛管孔隙度与土壤渗透能力更为密切,台湾桤木纯林在 20—40 cm 土层的非毛管孔隙度最大(3.56%),在 0—20 cm 土层也较大(3.97%)。

(3) 采用熵权法对台湾桤木不同混交造林水源涵养能力进行综合评价,权重值占比最大是枯落物最大持水量(18.6%),其次是枯落物蓄积量(15.9%)和枯落物有效拦蓄量(13.8%),最少是土壤毛管孔隙度(7.6%)。台湾桤木不同混交造林水源涵养能力综合评价排序为:处理 4>处理 8>处理 1>处理 9>处理 6>处理 2>处理 7>处理 5>处理 3>CK;台湾桤木与马尾松、巨尾桉和红锥混交造林水源涵养能力均优于台湾桤木纯林;且它们的混交比例对水源涵养能力影响更大,因此在营造台湾桤木混交林时要根据各树种的地位和作用进行合理的混交分配比例。本研究结果表明,营造台湾桤木混交林以处理 4(台湾桤木∶巨尾桉=1∶2),处理 8(台湾桤木∶红锥=2∶1)、处理 3(台湾桤木∶马尾松=1∶1)的水源涵养能力综合评价得分较高。

[参 考 文 献]

[1] 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[J].水土保持研究,2018,25(6):177-182.

[2] 马成武.不同树种水源涵养能力的研究[J].现代农业科技,2018(3):148,151.

[3] 魏文俊,尤文忠,赵刚,等.退化柞蚕林封育对枯落物和表层土壤持水效能的影响[J].生态学报,2016,36(3):721-728.

[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] 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.

[6] 彭玉华,谭长强,郑威,等.单性木兰生存群落凋落物及土壤水文生态效应[J].水土保持通报,2016,36(5):119-125,130.

[7] Dunkerley D. Percolation through leaf litter: What happens during rainfall events of varying intensity? [J]. Journal of Hydrology, 2015,525:737-746.

[8] 冯宜明,李毅,曹秀文,等.甘肃亚高山云杉人工林土壤特性及水源涵养功能对林分密度的响应特征[J].自然资源学报,2018,33(9):1529-1541.

[9] Bruijnzeel L A. Hydrological functions of tropical forests: Not seeing the soil for the trees? [J]. Agriculture, Ecosystems and Environment, 2004,104(1):185-228.

[10] Dietz J, Hölscher D, Leuschner C, et al. Rainfall partitioning in relation to forest structure in differently managed montane forest stands in Central Sulawesi, Indonesia[J]. Forest Ecology and Management, 2006, 237(1):170-178.

[11] Santos Terra M D C N, de Mello C R, de Mello J M, et al. Stemflow in a neotropical forest remnant: Vegetative determinants, spatial distribution and correlation with soil moisture[J]. Trees, 2018,32(1):323-335.

[12] 赵磊,王兵,蔡体久,等.江西大岗山不同密度杉木林枯落物持水与土壤贮水能力研究[J].水土保持学报,2013,27(1):203-208,246.

[13] 贺淑霞,李叙勇,莫菲,等.中国东部森林样带典型森林水源涵养功能[J].生态学报,2011,31(12):3285-3295.

(下转第 112 页)

[13] 秦嘉惠,程谅,曹丹妮,等.两种草本植物根系对土壤可蚀性的影响[J].水土保持研究,2019,26(2):55-61.
[14] 李建兴,何丙辉,谌芸.不同护坡草本植物的根系特征及对土壤渗透性的影响[J].生态学报,2013,33(5):1535-1544.
[15] 黄张玲.植被恢复对路堑边坡侵蚀及土壤理化性质的影响研究[D].湖北 武汉:华中农业大学,2013.
[16] 韩凤朋,郑纪勇,张兴昌.黄土退耕坡地植物根系分布特征及其对土壤养分的影响[J].农业工程学报,2009,25(2):50-55.
[17] 陶俊.三峡库区不同护坡草本根系分布对土壤理化性质的时间尺度效应[D].重庆:西南大学,2013.
[18] 陈罗成.新郑市气候变化特征分析及其影响[D].甘肃兰州:兰州大学,2017.
[19] 贾志清,卢琦,陈永富,等.南水北调中线工程总干渠沿线植物护坡模式与技术[J].林业科学,2004,40(4):94-98.
[20] 张云霞,李晓兵,陈云浩.草地植被盖度的多尺度遥感与实地测量方法综述[J].地球科学进展,2003,18(1):85-93.
[21] 张磊,苏芳莉,郭成久,等.灰色关联分析在不同生态修复模式土壤质量评价中的应用[J].沈阳农业大学学报,2009,40(6):703-707.
[22] 刘占锋,傅伯杰,刘国华,等.土壤质量与土壤质量指标及其评价[J].生态学报,2006,26(3):901-913.
[23] 鲁如坤.土壤农业化学分析方法[M].北京:中国农业科技出版社,2000.
[24] 李小英,段争虎.黄土高原土壤水分与植被相互作用研究进展[J].土壤通报,2012,43(6):1508-1514.
[25] 全国土壤普查办公室.中国土壤[M].北京:中国农业出版社,1995.
[26] 赵自稳,郭晓敏,牛德奎,等.不同季节和退化程度下山地草甸土壤氮素含量的变化[J].南方农业学报,2015,46(8):1401-1405.
[27] 贾兴永,李菊梅.土壤磷有效性及其与土壤性质关系的研究[J].中国土壤与肥料,2011(6):76-82.
[28] 易玉林.河南省土壤养分状况研究[J].河南科学,2012,30(7):882-886.
[29] 李贵宝,尹澄清,孙克刚,等.河南省土壤库中钾养分资源状况的研究[J].自然资源学报,2000,15(2):138-142.
[30] 刘序,李华兴,胡月明,等.大尺度下广东赤红壤全钾含量与地形因子相关分析[J].土壤通报,2010,41(4):886-891.
[31] 江叶枫,郭熙.基于协同克里格的耕层土壤速效钾空间异质性研究[J].浙江农业学报,2019,31(1):139-148.
[32] 全思懋,管晓进,王绪奎,等.江苏省域农田土壤速效钾含量变化及其影响因子研究[J].土壤,2019,51(2):257-262.
[33] 肖德荣,田昆,张利权.滇西北高原纳帕海湿地植物多样性与土壤肥力的关系[J].生态学报,2008,28(7):3116-3124.
[34] 蔡晓布,张永青,邵伟.藏北高寒草原草地退化及其驱动力分析[J].土壤,2007,39(6):855-858.
[35] 马志林,李杰君,李虎星,等.南水北调中线工程渠坡植草护坡问题[J].中国水利,2019(6):44-45,57.
[36] 岳星慧.杂草在边坡生态恢复中的应用[J].青海科技,2006,13(3):42-44.

(上接第 105 页)

[14] 塔莉,杨新兵,朱辰光,等.华北土石山区森林枯落物与土壤水文效应研究[J].河北农业大学学报,2015,38(3):59-63.
[15] 彭玉华,谭长强,何琴飞,等.台湾桤木与不同树种混交初期土壤理化性质的对比分析[J].中南林业科技大学学报,2018,38(11):22-28.
[16] 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.
[17] 王梓默,何怀江,林士杰,等.吉林省西部不同林分类型凋落物与土壤持水能力研究[J].吉林林业科技,2019,48(1):21-26,33.
[18] 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.
[19] 彭玉华,黄小荣,申文辉,等.林型差异对土壤理化性状及其持水能力的影响[J].中南林业科技大学学报,2017,37(8):1-5,17.
[20] 孙立博,余新晓,陈丽华,等.坝上高原杨树人工林的枯落物及土壤水源涵养功能退化[J].水土保持学报,2019,33(1):104-110.