

# 米老排与红锥的不同种植模式对林下凋落物和土壤水源涵养能力的影响

梁育兴<sup>1</sup>, 袁在翔<sup>2</sup>, 王凯<sup>1</sup>, 李荣生<sup>2</sup>,  
张少杰<sup>1</sup>, 张鹏鹏<sup>2</sup>, 陈勇<sup>3</sup>, 孙煜杰<sup>2</sup>

(1.广东省德庆林场, 广东 肇庆 526600; 2.中国林业科学研究院  
热带林业研究所, 广东 广州 510520; 3.广州市林业和园林科学研究院, 广东 广州 510405)

**摘要:** [目的] 探究米老排与红锥混交组合模式的水源涵养能力特征, 筛选出水源涵养能力最佳的混交组合模式, 为西江流域水源涵养林的构建与经营管理提供科学依据。[方法] 通过3种混交比例(1:3, 2:2, 3:1)和3种混交方式(株间混交、行带混交、块状混交)设置了9种米老排与红锥的混交林组合模式, 并以米老排、红锥纯林为对照, 对比分析了11种植植模式凋落物层、土壤层的水源涵养能力差异, 利用熵权TOPSIS(technique for order preference by similarity to an ideal solution)模型筛选出最佳水源涵养能力的混交组合模式。[结果] ①试验林凋落物层生物量、自然持水量、有效拦蓄量和最大持水量分别为1.17~4.21, 0.38~2.29, 5.15~10.58, 6.40~13.37 t/hm<sup>2</sup>, 均与试验林中米老排比例显著正相关( $p < 0.05$ ); 相比于株间混交、块状混交, 行带混交的凋落物层生物量与有效拦蓄量较高。②试验林0—30 cm土层的自然持水量、毛管持水量、非毛管持水量、饱和蓄水量的变化范围分别为756.14~1 007.21, 1 130.73~1 388.40, 117.96~422.63, 1 444.70~1 590.66 t/hm<sup>2</sup>; 其中, 毛管持水量、非毛管持水量在不同林分之间差异显著, 且均与试验林中米老排比例存在显著的线性回归关系( $p < 0.05$ )。③米老排与红锥以3:1混交比例进行行带混交的林分水源涵养能力最好, 米老排纯林次之, 其后是其余混交林, 最后是红锥纯林。[结论] 在幼龄林阶段, 米老排与红锥混交林的水源涵养能力在一定程度上好于各自的纯林, 且这种混交效应受混交比例与混交方式的影响。

**关键词:** 水源涵养; 种植模式; 凋落物; 土壤; 熵权TOPSIS模型

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2024)06-0057-11

中图分类号: S714.7, S715.3

**文献参数:** 梁育兴, 袁在翔, 王凯, 等. 米老排与红锥的不同种植模式对林下凋落物和土壤水源涵养能力的影响[J]. 水土保持通报, 2024, 44(6): 57-67. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2024.06.007; Liang Yuxing, Yuan Zaixiang, Wang Kai, et al. Effects of different planting models of *Mytilaria laosensis* and *Castanopsis hystrix* on water conservation capacity of litter and soil under forest [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2024, 44(6): 57-67.

## Effects of Different Planting Models of *Mytilaria Laosensis* and *Castanopsis Hystrix* on Water Conservation Capacity of Litter and Soil Under Forest

Liang Yuxing<sup>1</sup>, Yuan Zaixiang<sup>2</sup>, Wang Kai<sup>1</sup>, Li Rongsheng<sup>2</sup>,  
Zhang Shaojie<sup>1</sup>, Zhang Pengpeng<sup>2</sup>, Chen Yong<sup>3</sup>, Sun Yujie<sup>2</sup>

(1. Deqing Forest Farm of Guangdong, Zhaoqing, Guangdong 526600, China;

2. Research Institute of Tropical Forestry, Chinese Academy of Forestry, Guangzhou, Guangdong 510520, China; 3. Guangzhou Institute of Forestry and Landscape Architecture, Guangzhou, Guangdong 510405, China)

**Abstract:** [Objective] The characteristics of water conservation capacity of the mixed combination models of *Mytilaria laosensis* and *Castanopsis hystrix* were explored, and the best mixed combination mode of water

收稿日期: 2024-05-14

修回日期: 2024-09-19

资助项目: 广东省林学会科技计划项目“西江流域水源涵养林模式构建与筛选”(2021-GDFS-KJ-05); 广州市科技局社会发展项目“广州市生态园林科技协同创新中心”(202206010058)

第一作者: 梁育兴(1975—), 男(汉族), 广东省梅州市人, 本科, 高级工程师, 主要从事水源涵养林培育技术方面的研究工作。Email: 254724982@qq.com.

通信作者: 袁在翔(1992—), 男(汉族), 湖北省黄冈市人, 博士, 助理研究员, 主要从事森林生态学等方面的研究工作。Email: yzx0090@163.com.

conservation capacity was selected, in order to provided a scientific basis for the construction, operation and management of water conservation forest in Xijiang River basin. [Methods] Nine mixed plantation patterns with three mixing proportions (i.e., 1 : 3, 2 : 2, and 3 : 1) and three mixing modes (i.e., interplant mixing, strip and row mixing, and block mixing) of *M. laosensis* and *C. hystrix* were selected, and the pure plantations of both species served as controls. The differences in the water conservation capacity of litter and soil among the eleven planting models were evaluated, and the mixed plantation with the optimal water conservation capacity was identified using an entropy weight TOPSIS (technique for order preference by similarity to an ideal solution) model. [Results] ① The biomass, natural water storage, effective water interception, and maximum water interception in the litter layer ranged from 1.17 to 4.21, 0.38 to 2.29, 5.15 to 10.58, and 6.40 to 13.37 t/hm<sup>2</sup>, respectively. These indices were positively and significantly correlated with the percentage of *M. laosensis* in the plantations ( $p < 0.05$ ). Compared to interplant mixing and block mixing, the strip and row mixing of the plantations yielded higher biomass and effective water interception in the litter layer. ② The natural moisture storage, capillary water storage, non-capillary water storage, and saturated water storage in soil at a depth of 0—30 cm ranged from 756.14 to 1 007.21, 1 130.73 to 1 388.40, 117.96 to 422.63, and 1 444.70 to 1 590.66 t/hm<sup>2</sup>, respectively. Capillary and non-capillary water storage differed significantly among the plantations and were positively correlated with the percentage of *M. laosensis* in the plantations ( $p < 0.05$ ). ③ The mixed plantation of *M. laosensis* and *C. hystrix* with a ratio of 3 : 1 and strip and row mixing exhibited the optimal water conservation capacity. The water conservation capacity of the other plantations ranked as follows: pure plantation of *M. laosensis*, other mixed plantation patterns, and pure plantation of *C. hystrix*. [Conclusion] The water conservation capacity of the mixed plantation of *M. laosensis* and *C. hystrix* was, to a certain extent, better than that of each pure plantation in the young stand stage, which was influenced by the mixing proportions and modes.

**Keywords:** water conservation; planting models; litter; soil; entropy weight TOPSIS model

水源涵养是森林生态系统服务功能及其价值评估的重要指标之一<sup>[1-2]</sup>,主要体现在森林生态系统通过林冠层、林下植被层、凋落物层、土壤层对降水的截留、入渗、蓄积以及蒸散发的调控作用<sup>[3-4]</sup>,实现对降水的再分配,达到降低水土流失、控制土壤沙化的目的<sup>[5]</sup>。凋落物层和土壤层是森林水源涵养的主体,二者水源涵养量累计可达森林水源涵养总量的85%<sup>[4, 6]</sup>,并且在不同林分之间存在一定差异<sup>[7-8]</sup>,因此常用凋落物层与土壤层的蓄水能力大小来表征不同林分水源涵养能力的强弱<sup>[9]</sup>。例如,陈晶亮等<sup>[4]</sup>利用熵权法对青海云杉(*Picea crassifolia*)纯林、油松(*Pinus tabulaiformis*)纯林及其混交林的凋落物和土壤层水源涵养能力进行评价,结果表明混交林水源涵养能力优于各自的纯林;而聂泽旭等<sup>[8]</sup>对华蓥市山区典型林分的枯落物层与土壤层持水能力进行综合评估,发现近自然经营的杉木(*Cunninghamia lanceolata*)纯林水源涵养能力最强,马尾松(*Pinus massoniana*)杉木混交林的水源涵养能力最弱。由此可见,即使用相同的水源涵养表征指标也会出现相反的评价结果,这可能是由于森林水源涵养能力不仅受林分类型影响<sup>[10]</sup>,还可能与林木种类、混交模式等因素有

关<sup>[11-12]</sup>。因此,考虑混交模式导致的凋落物和土壤水源涵养能力差异,对于特定树种人工林水源涵养能力的准确评价具有重要意义。

西江流域是广东省水源涵养林建设的重点区域,每年有上千公顷的高质量水源涵养林建设任务,故亟需水源涵养林构建技术的支撑。米老排(*Mytilaria laosensis*)、红锥(*Castanopsis hystrix*)为广东省水源涵养林建设的主要树种<sup>[13]</sup>,然而以往关于这两种纯林及其混交林的水源涵养能力研究较少。为此,本研究通过3种混交比例(1 : 3, 2 : 2, 3 : 1)和3种混交方式(株间混交、行带混交、块状混交)设置了9种米老排与红锥的混交林组合模式,并以米老排、红锥纯林为对照,比较分析了11个种植模式凋落物层与土壤层的水源涵养能力差异,利用熵权 TOPSIS 模型筛选出最佳水源涵养能力的林分构建模式,以期对西江流域水源涵养林的建设和经营管理提供科学依据。

## 1 材料与方 法

### 1.1 研究地概况

研究地位于肇庆市德庆林场(111°22′—112°06′E, 23°07′—23°25′N),属于南亚热带季风气候,夏长冬短,水热同季;其中肇庆市2023年降水量

1 592.3 mm, 平均气温 22.4 °C, 日照时数 1 601.2 h。土壤类型以红壤和山地黄壤为主, pH 值偏酸性至微酸性。

试验林地理位置为 112°10'57.6"E, 23°9'7.6"N, 海拔高度为 27~93 m, 坡度为 10°~30°, 坡向为南或西南, 土层深度 60—80 cm。乔木树种为米老排、红锥以及极少量萌生的桉树(*Eucalyptus urophylla*), 主要灌木为白楸(*Mallotus paniculatus*)、山鸡椒(*Litsea cubeba*)、山茶(*Camellia japonica*), 主要草本为

一点红(*Emilia sonchifolia*)、粽叶芦(*Thysanolaena latifolia*)、闽粤千里光(*Senecio stauntonii*)。

## 1.2 试验设计

采用随机完全区组设计, 在德庆林场桉树人工林皆伐迹地上以 2 m×3 m 的初植密度营造了 11 hm<sup>2</sup> 米老排、红锥及其混交的试验林。通过 3 种混交比例(1:3, 2:2, 3:1)与 3 种混交方式(株间混交、行带混交、块状混交)设置了 9 种混交组合模式, 并以米老排、红锥纯林为对照, 共 11 个种植模式(图 1)。

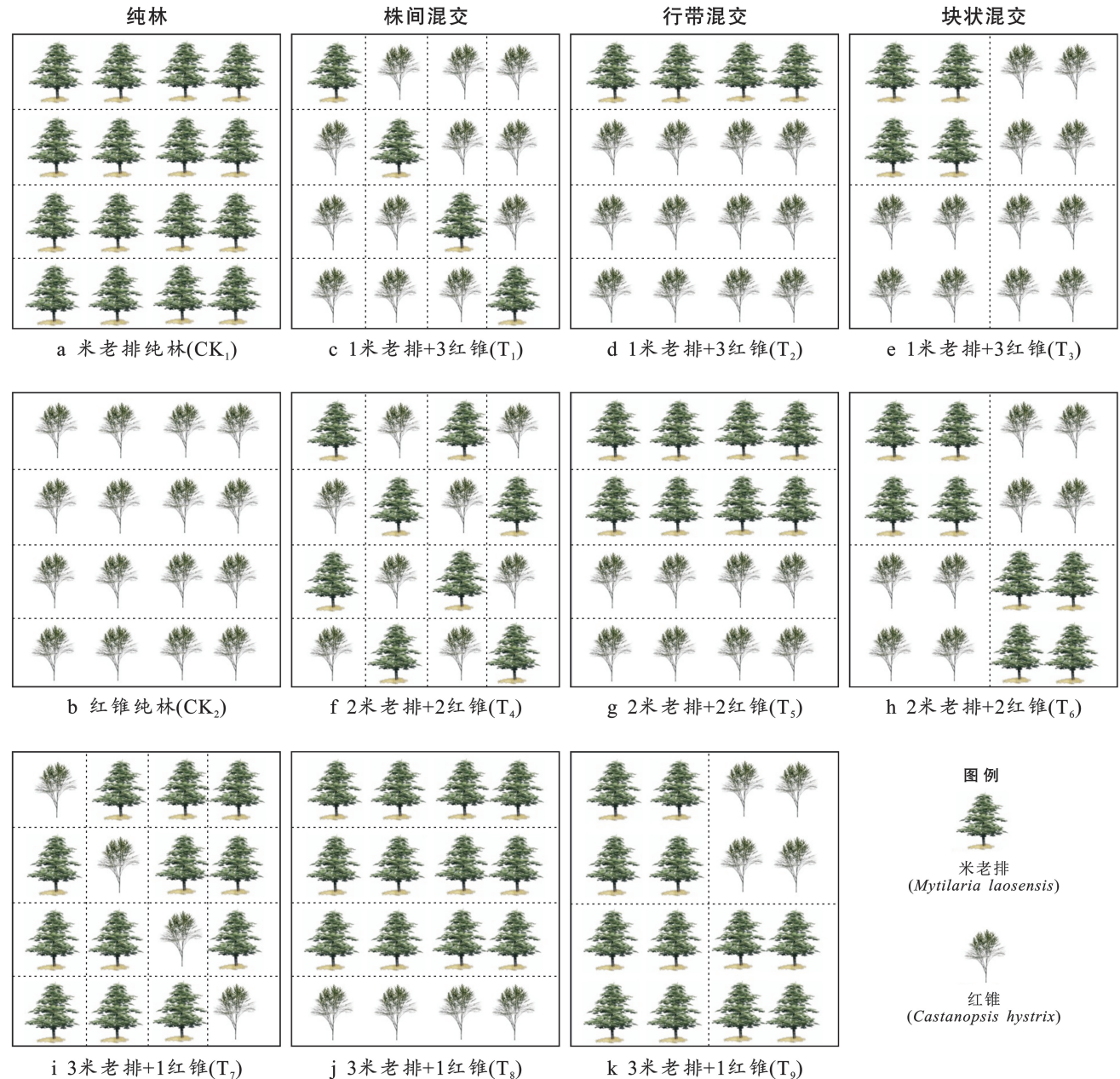


图 1 米老排、红锥纯林及其不同模式的混交林示意图

Fig.1 Diagrams of pure and mixture plantations of *Mytilaria laosensis* and *Castanopsis hystrix*

每个种植模式具有 4 个重复, 每个重复的种植小区面积为 50 m×50 m。于 2023 年 11—12 月, 对

5 a 生的试验林进行样地调查。在每个调查样地内, 进行每木检尺, 记录每株林木的树种、胸径、树高、

冠幅等数据(表 1)。同时,在样地的中心与四角设置 5 个 2 m×2 m 的调查小样方,记录主要灌木、草本等数据。在每个 50 m×50 m 调查样地内,沿对角线设置 3 个 1 m×1 m 的凋落物小样方,同时收集小

样方内所有的凋落物,并且避免带入上层土壤。在每个凋落物小样方旁挖取土壤剖面,分别对 0—10, 10—20, 20—30 cm 这 3 个土层进行环刀采样获取容重指标。

表 1 米老排、红锥及其混交的试验林概况

Table 1 Basic surveys of pure and mixture plantations of *Mytilaria laosensis* and *Castanopsis hystrix*

处理	种植模式	平均胸径/cm		平均树高/m		平均冠幅/m	
		米老排	红锥	米老排	红锥	米老排	红锥
CK <sub>1</sub>	米老排纯林	4.5		2.3		1.5	
CK <sub>2</sub>	红锥纯林		2.3		1.7		0.8
T <sub>1</sub>	1 米老排+3 红锥,株间混交	3.2	1.9	2.2	1.6	1.5	0.8
T <sub>2</sub>	1 米老排+3 红锥,行带混交	2.7	2.5	1.9	1.8	1.1	0.9
T <sub>3</sub>	1 米老排+3 红锥,块状混交	3.1	2.0	2.4	1.4	1.0	0.8
T <sub>4</sub>	2 米老排+2 红锥,株间混交	3.0	2.9	1.9	1.8	1.0	1.2
T <sub>5</sub>	2 米老排+2 红锥,行带混交	2.9	1.8	2.0	1.5	1.0	0.8
T <sub>6</sub>	2 米老排+2 红锥,块状混交	3.1	1.8	1.8	1.4	1.0	0.6
T <sub>7</sub>	3 米老排+1 红锥,株间混交	3.7	2.0	2.3	1.5	1.1	0.8
T <sub>8</sub>	3 米老排+1 红锥,行带混交	3.6	2.0	2.7	1.6	1.5	0.9
T <sub>9</sub>	3 米老排+1 红锥,块状混交	3.1	1.5	1.8	1.1	0.9	0.6

注:表中数据为 4 个重复小区的平均值。

### 1.3 试验指标测定

1.3.1 凋落物生物量与持水能力指标测定 刚采集完的凋落物在称完鲜重后,置于 65 °C 烘箱中烘干 48 h 至恒重,测定其干重与含水率。然后,采用室内浸泡法测定凋落物的持水能力<sup>[14]</sup>。具体为,称取 20 g 烘干后的凋落物,放入已知质量的 0.15 mm 尼龙网袋中,置于清水中浸泡 0.5, 1.0, 2.0, 3.0, 4.0, 6.0, 8.0, 10.0, 12.0, 24.0 h, 在对应的时间点取出凋落物,静置至不滴水时用精度为 0.01 g 的电子天平称湿重。凋落物生物量( $B$ )、自然含水率( $R_0$ )、最大持水率( $R_m$ )、最大持水量( $L_m$ )、有效拦蓄量( $P$ )、吸水速率( $S$ )的计算公式为<sup>[15-16]</sup>:

$$B = W_D \times 10^{-2} \quad (1)$$

$$R_0 = (W_0 - W_D) / W_D \quad (2)$$

$$R_m = (W_{24} - W_D) / W_D \quad (3)$$

$$L_m = (R_m - R_0) \times B \quad (4)$$

$$P = (0.85 \times R_m - R_0) \times B \quad (5)$$

$$S = (W_t - W_0) / t \times 10^2 \quad (6)$$

式中: $B$  为单位面积凋落物生物量( $t/hm^2$ );  $W_D$  为凋落物干重( $g$ );  $W_0$  为凋落物鲜重( $g$ );  $W_{24}$  为烘干的凋落物浸泡 24 h 后的质量( $g$ );  $W_t$  为烘干的凋落物浸泡  $t$  后的质量( $g$ );  $R_0$  为凋落物自然含水率(%);  $R_m$  为凋落物最大持水率(%);  $L_m$  为凋落物最大持水量( $t/hm^2$ );  $P$  为凋落物有效拦蓄量( $t/hm^2$ );  $S$  为凋落物吸水速率 [ $t/(hm^2 \cdot h)$ ];  $t$  为浸泡时间( $h$ ), 0.85 为有效拦蓄量的调整系数。

1.3.2 土壤水源涵养能力指标测定 根据《森林土壤水分—物理性质的测定》(LY/T 1215—1999)<sup>[17]</sup>, 采用环刀法与烘干法测定土壤容重、含水率、孔隙度等指标。通过土壤毛管孔隙度( $P_a$ )、非毛管孔隙度( $P_b$ )和总孔隙度( $P$ )等指标分别计算毛管持水量( $W_a$ )、非毛管持水量(有效持水量,  $W_b$ )、饱和蓄水量( $W$ ), 计算方法详见参考文献[18]; 土壤自然持水量( $W_i$ )计算方法详见参考文献[19]。上述计算公式分别为:

$$W_a = P_a \times h_i \times 10^4 \quad (7)$$

$$W_b = P_b \times h_i \times 10^4 \quad (8)$$

$$W = P \times h_i \times 10^4 \quad (9)$$

$$W_i = \rho_i \cdot (1 - \theta_i) \cdot C_i \cdot h_i \times 10^2 \quad (10)$$

式中: $P_a$  为土壤毛管孔隙度(%);  $P_b$  为土壤非毛管孔隙度(%);  $P$  为土壤总孔隙度(%);  $W_a$  为土壤毛管持水量( $t/hm^2$ );  $W_b$  为土壤有效持水量( $t/hm^2$ );  $W$  为土壤饱和蓄水量( $t/hm^2$ );  $W_i$  为第  $i$  层土壤自然持水量( $t/hm^2$ );  $\rho_i$  为第  $i$  层土壤容重( $g/cm^3$ );  $\theta_i$  为第  $i$  层砾石含量(%);  $C_i$  为第  $i$  层土壤含水率(%);  $h_i$  为第  $i$  层土壤厚度( $cm$ )。

1.3.3 凋落物与土壤水源涵养能力的综合评价 熵权 TOPSIS 模型是通过评价对象与正、负理想解之间的欧式距离来计算相对接近度, 进而反映评价对象的优劣, 故也称为“逼近理想解排序法”<sup>[20]</sup>。该方法对样本容量与数据分布没有严格要求, 并且具有原始数据信息利用充分、评价结果客观准确的优势<sup>[21]</sup>。因而,

本研究基于熵权 TOPSIS 模型对凋落物与土壤的水源涵养能力关键指标进行综合评价。具体计算过程详见参考文献[22]。

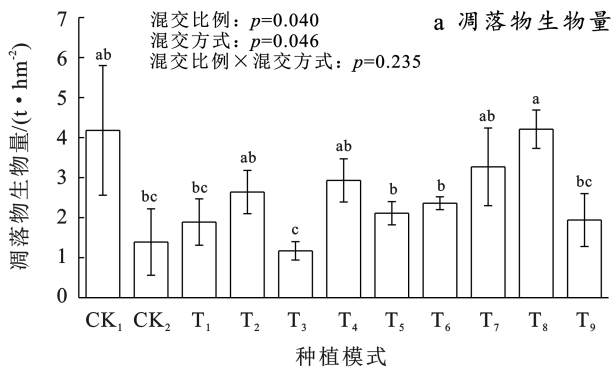
## 1.4 数据分析

用 Excel 2016 进行数据处理,用 SPSS 20.0 进行方差分析,用 Origin 2022 进行绘图,利用 R 4.3.2 进行熵权 TOPSIS 综合评价。利用 LSD 法进行差异显著性检验,显著水平定义为  $p < 0.05$ ,极显著水平定义为  $p < 0.01$ 。

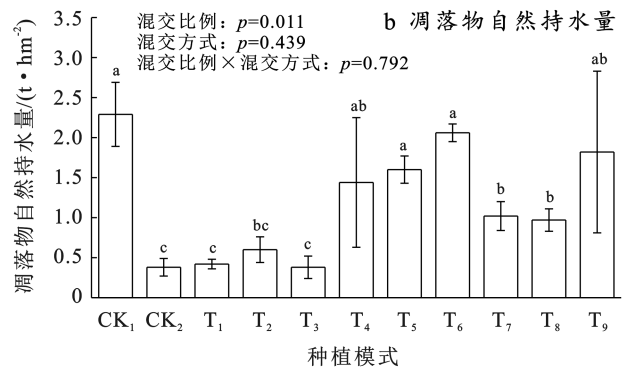
## 2 结果与分析

### 2.1 凋落物特征及水源涵养能力

#### 2.1.1 凋落物生物量与自然持水量



凋落物生物量与自然持水量在不同种植模式之间均有显著差异 ( $p < 0.05$ ), 变异系数分别为 39.88%, 59.47%。其中,凋落物的生物量在  $T_8$  种植模式取得最大值 ( $4.21 \text{ t/hm}^2$ ), 在  $T_3$  种植模式取得最小值 ( $1.17 \text{ t/hm}^2$ );凋落物的自然持水量在  $CK_1$  林分取得最大值 ( $2.29 \text{ t/hm}^2$ ), 而在  $CK_2, T_3$  等林分取得最小值 ( $0.38 \text{ t/hm}^2$ )。凋落物的生物量与自然持水量受混交比例影响显著,并且凋落物的生物量还受混交方式影响(图 2)。对于米老排所占比例较高的种植模式 ( $CK_1, T_7, T_8, T_9$ ),其凋落物的生物量与自然持水量总体上要高于红锥所占比例较高的种植模式 ( $CK_2, T_1, T_2, T_3$ )。相较于株间与块状混交,行带混交的凋落物的生物量总体上较高。



注:图中左上角为双因素方差分析  $p$  值;不同小写字母表示在不同林分类型之间差异显著。下同。

图 2 11 种植模式凋落物生物量及其自然持水量

Fig.2 Biomass and natural water storage in litter layers of 11 planting models

#### 2.1.2 凋落物持水过程

由图 3 可知,11 个种植模式凋落物的持水过程基本相似,即凋落物持水量的增幅与吸水速率的降幅在浸水 0—4 h 内均较大,在浸水 8—12 h 内均逐渐减小,在浸水 12 h 后均趋向于 0。凋落物持水量、吸水速率分别与浸泡时间之间具

有较好的对数拟合函数 [ $y = a \ln x + b$ ] 和幂指数拟合函数 ( $y = a \cdot x^b$ ) 关系,且各拟合函数的  $R^2$  均大于 0.93(表 2)。各种种植模式凋落物的持水量与吸水速率曲线均介于  $CK_2$  和  $T_8$  之间;并且  $T_3$  与  $CK_2$  种植模式的凋落物持水过程最为接近,均为同期最低。

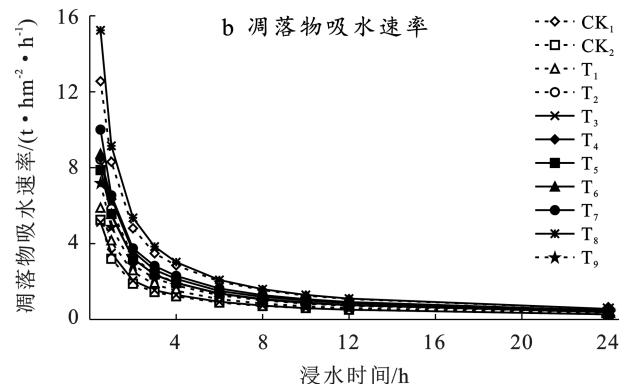
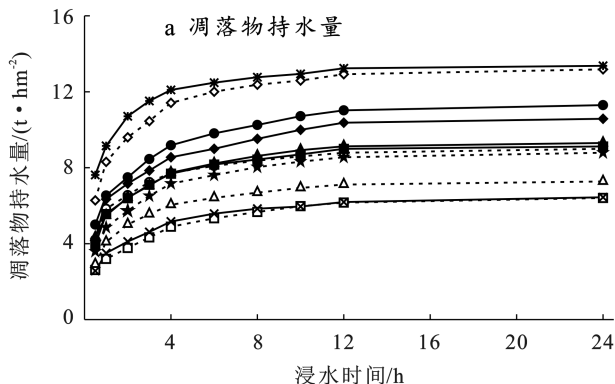


图 3 11 种植模式凋落物的持水量与吸水速率

Fig.3 Water holding capacity and water absorption rate in litter layers of 11 planting models

表 2 11 种植模式凋落物的持水量、吸水速率与浸水时间的拟合方程  
Table 2 Fitting equations between water holding capacity, water absorption rate and immersion time in litter layers of 11 planting models

处理	凋落物持水量(y)与浸水时间(x)			凋落物吸水速率(y)与浸水时间(x)		
	拟合函数	$R^2$	$p$	拟合函数	$R^2$	$p$
CK <sub>1</sub>	$y=1.856 \ln x+8.254$	0.955	<0.01	$y=7.757 x^{-0.726}$	0.996	<0.01
CK <sub>2</sub>	$y=1.091 \ln x+3.272$	0.979	<0.01	$y=3.182 x^{-0.723}$	0.999	<0.01
T <sub>1</sub>	$y=1.183 \ln x+4.108$	0.963	<0.01	$y=3.774 x^{-0.665}$	0.992	<0.01
T <sub>2</sub>	$y=1.249 \ln x+5.652$	0.953	<0.01	$y=5.287 x^{-0.716}$	0.992	<0.01
T <sub>3</sub>	$y=1.062 \ln x+3.475$	0.977	<0.01	$y=3.261 x^{-0.683}$	0.995	<0.01
T <sub>4</sub>	$y=1.660 \ln x+5.986$	0.969	<0.01	$y=5.567 x^{-0.675}$	0.985	<0.01
T <sub>5</sub>	$y=1.386 \ln x+5.426$	0.959	<0.01	$y=5.040 x^{-0.691}$	0.991	<0.01
T <sub>6</sub>	$y=1.392 \ln x+5.528$	0.972	<0.01	$y=5.266 x^{-0.734}$	0.998	<0.01
T <sub>7</sub>	$y=1.737 \ln x+6.487$	0.978	<0.01	$y=6.175 x^{-0.721}$	0.997	<0.01
T <sub>8</sub>	$y=1.550 \ln x+9.368$	0.935	<0.01	$y=8.925 x^{-0.785}$	0.999	<0.01
T <sub>9</sub>	$y=1.435 \ln x+4.857$	0.974	<0.01	$y=4.551 x^{-0.687}$	0.996	<0.01

2.1.3 凋落物持水能力 凋落物有效拦蓄量和最大持水量在不同林分之间均存在一定差异,变异系数分别为 24.58%和 25.25%,且二者具有相同的变化趋势(图 4)。具体表现为,凋落物有效拦蓄量与最大持水量均在 T<sub>8</sub> 林分具有最大值(10.58 t/hm<sup>2</sup>, 13.37 t/hm<sup>2</sup>),在 CK<sub>2</sub> 林分具有最小值(5.15 t/hm<sup>2</sup>, 6.40 t/hm<sup>2</sup>),最大值约为最小值的 2.1 倍。同样地,凋落

物有效拦蓄量与最大持水量受混交比例显著影响,并且有效拦蓄量还受混交方式显著影响(图 4)。相较于红锥所占比例高的林分,米老排所占比例高的林分凋落物有效拦蓄量与最大持水量均总体较大且随着米老排比例的升高越发显著。相较于株间混交和块状混交,行带混交一般具有较高的凋落物有效拦蓄量。

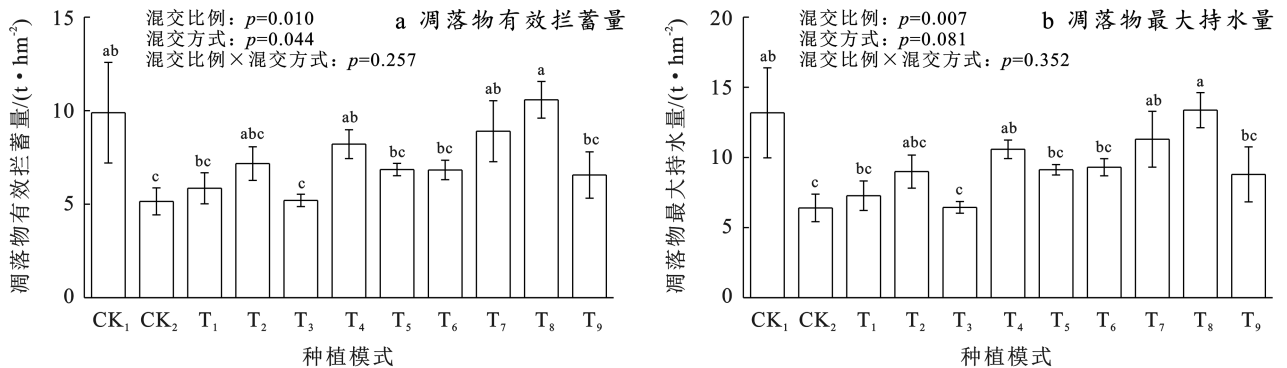


图 4 11 种植模式凋落物有效拦蓄量(a)与最大持水量(b)

Fig.4 Effective water interception amount (a) and maximum water interception amount (b) in litter layers of 11 planting models

## 2.2 土壤特征及水源涵养能力

2.2.1 土壤物理性质 由表 3 可知,试验林土壤容重、含水率、毛管孔隙度、非毛管孔隙度、总孔隙度的变化范围分别为 1.11~1.56 g/cm<sup>3</sup>, 15.53%~25.36%, 32.53%~47.59%, 3.06%~16.33%, 45.07%~56.28%; 其中,土壤容重随土层厚度增加而增加,而非毛管孔隙度与总孔隙度的总体变化趋势则相反。在不同种植模式之间,土壤容重、含水率、孔隙度的差异主要在表层(0—10 cm)土壤中;例如,T<sub>8</sub> 种植模式表层土壤的容重最低和非毛管孔隙度最高;CK<sub>2</sub> 种植模式表层土壤的含水率与总孔隙度最低;T<sub>3</sub> 种植模式表层土

壤的毛管孔隙度最高。

2.2.2 土壤蓄水能力 由表 4 可知,试验林土壤自然持水量、非毛管持水量、饱和蓄水量受土层厚度极显著影响,毛管持水量、非毛管持水量受种植模式极显著影响( $p < 0.01$ )。具体表现为,自然持水量随土层厚度增加而增加,非毛管持水量与饱和蓄水量总体变化趋势则相反;在整个土层中,毛管持水量在 T<sub>3</sub> 种植模式中最高(1 388.40 t/hm<sup>2</sup>),在 CK<sub>1</sub> 模式中最低(1 130.73 t/hm<sup>2</sup>),非毛管持水量在 CK<sub>1</sub> 模式中最高(422.63 t/hm<sup>2</sup>),在 CK<sub>2</sub> 模式中最低(117.96 t/hm<sup>2</sup>)。

表 3 不同土层 11 种植模式土壤物理性质

Table 3 Soil physical properties of 11 planting models in different soil layer

土层厚度/cm	种植模式	土壤容重/(g·cm <sup>-3</sup> )	含水率/%	毛管孔隙度/%	非毛管孔隙度/%	总孔隙度/%
0—10	CK <sub>1</sub>	1.22±0.06 <sup>ab</sup>	18.75±3.31 <sup>bc</sup>	38.79±3.03 <sup>c</sup>	14.13±2.77 <sup>ab</sup>	52.92±3.79 <sup>ab</sup>
	CK <sub>2</sub>	1.45±0.06 <sup>a</sup>	15.53±2.51 <sup>c</sup>	43.78±1.78 <sup>ab</sup>	4.24±0.85 <sup>c</sup>	48.02±1.95 <sup>b</sup>
	T <sub>1</sub>	1.33±0.06 <sup>ab</sup>	18.81±0.60 <sup>abc</sup>	38.68±1.11 <sup>c</sup>	11.85±3.56 <sup>abc</sup>	50.53±2.77 <sup>ab</sup>
	T <sub>2</sub>	1.23±0.08 <sup>ab</sup>	20.3±3.25 <sup>abc</sup>	44.14±1.14 <sup>ab</sup>	11.8±3.44 <sup>abc</sup>	55.94±2.64 <sup>a</sup>
	T <sub>3</sub>	1.26±0.12 <sup>ab</sup>	24.71±3.79 <sup>a</sup>	47.59±1.91 <sup>a</sup>	7.39±3.66 <sup>bc</sup>	54.98±1.76 <sup>ab</sup>
	T <sub>4</sub>	1.19±0.07 <sup>b</sup>	25.36±0.73 <sup>a</sup>	40.40±0.52 <sup>bc</sup>	14.77±1.78 <sup>ab</sup>	55.17±2.04 <sup>a</sup>
	T <sub>5</sub>	1.28±0.04 <sup>ab</sup>	19.51±1.21 <sup>abc</sup>	40.85±1.72 <sup>bc</sup>	10.42±0.45 <sup>abc</sup>	51.27±1.27 <sup>ab</sup>
	T <sub>6</sub>	1.30±0.07 <sup>ab</sup>	18.07±1.48 <sup>bc</sup>	42.83±1.45 <sup>abc</sup>	9.48±3.45 <sup>abc</sup>	52.31±2.05 <sup>ab</sup>
	T <sub>7</sub>	1.15±0.13 <sup>b</sup>	23.05±1.98 <sup>ab</sup>	42.11±2.45 <sup>bc</sup>	14.17±4.12 <sup>ab</sup>	56.28±1.68 <sup>a</sup>
10—20	T <sub>8</sub>	1.11±0.10 <sup>b</sup>	22.17±2.10 <sup>ab</sup>	39.63±0.69 <sup>bc</sup>	16.04±2.70 <sup>a</sup>	55.67±3.39 <sup>a</sup>
	T <sub>9</sub>	1.12±0.08 <sup>b</sup>	24.12±0.76 <sup>ab</sup>	43.56±0.72 <sup>abc</sup>	10.47±2.75 <sup>abc</sup>	54.04±2.12 <sup>ab</sup>
	CK <sub>1</sub>	1.33±0.03 <sup>a</sup>	19.05±2.18 <sup>ab</sup>	41.75±1.81 <sup>ab</sup>	11.80±1.13 <sup>ab</sup>	53.55±2.46 <sup>a</sup>
	CK <sub>2</sub>	1.49±0.08 <sup>a</sup>	18.79±1.87 <sup>ab</sup>	44.27±1.97 <sup>ab</sup>	3.06±0.80 <sup>c</sup>	47.34±2.64 <sup>a</sup>
	T <sub>1</sub>	1.44±0.08 <sup>a</sup>	17.38±0.84 <sup>b</sup>	46.9±6.66 <sup>a</sup>	4.61±0.53 <sup>c</sup>	51.51±6.81 <sup>a</sup>
	T <sub>2</sub>	1.41±0.03 <sup>a</sup>	20.86±3.53 <sup>ab</sup>	46.26±1.29 <sup>a</sup>	7.46±3.10 <sup>bc</sup>	53.72±2.02 <sup>a</sup>
	T <sub>3</sub>	1.35±0.09 <sup>a</sup>	23.39±2.08 <sup>ab</sup>	44.70±1.30 <sup>a</sup>	7.93±2.80 <sup>bc</sup>	52.63±2.16 <sup>a</sup>
	T <sub>4</sub>	1.40±0.10 <sup>a</sup>	25.06±0.90 <sup>a</sup>	41.99±1.18 <sup>ab</sup>	8.06±2.85 <sup>bc</sup>	50.05±2.41 <sup>a</sup>
	T <sub>5</sub>	1.47±0.06 <sup>a</sup>	19.79±0.93 <sup>ab</sup>	39.59±1.03 <sup>ab</sup>	8.48±2.07 <sup>abc</sup>	48.07±1.10 <sup>a</sup>
20—30	T <sub>6</sub>	1.42±0.06 <sup>a</sup>	18.73±2.75 <sup>ab</sup>	41.78±1.83 <sup>ab</sup>	7.47±4.24 <sup>bc</sup>	49.25±2.51 <sup>a</sup>
	T <sub>7</sub>	1.41±0.05 <sup>a</sup>	22.45±1.05 <sup>ab</sup>	43.78±1.94 <sup>ab</sup>	6.77±1.61 <sup>bc</sup>	50.54±2.31 <sup>a</sup>
	T <sub>8</sub>	1.32±0.12 <sup>a</sup>	21.83±4.18 <sup>ab</sup>	37.14±2.13 <sup>b</sup>	15.04±2.16 <sup>a</sup>	52.18±1.81 <sup>a</sup>
	T <sub>9</sub>	1.30±0.04 <sup>a</sup>	25.02±1.26 <sup>a</sup>	41.81±0.71 <sup>ab</sup>	8.65±1.94 <sup>abc</sup>	50.46±1.24 <sup>a</sup>
	CK <sub>1</sub>	1.43±0.04 <sup>a</sup>	18.87±2.48 <sup>a</sup>	32.53±7.87 <sup>b</sup>	16.33±6.07 <sup>a</sup>	48.86±2.24 <sup>a</sup>
	CK <sub>2</sub>	1.56±0.08 <sup>a</sup>	18.75±1.19 <sup>a</sup>	44.62±2.67 <sup>a</sup>	4.49±1.59 <sup>b</sup>	49.11±4.25 <sup>a</sup>
	T <sub>1</sub>	1.53±0.04 <sup>a</sup>	19.64±1.18 <sup>a</sup>	39.50±1.30 <sup>ab</sup>	5.57±2.31 <sup>b</sup>	45.07±3.35 <sup>a</sup>
	T <sub>2</sub>	1.47±0.02 <sup>a</sup>	20.91±3.04 <sup>a</sup>	44.20±1.83 <sup>a</sup>	5.20±1.80 <sup>b</sup>	49.40±0.47 <sup>a</sup>
	T <sub>3</sub>	1.47±0.07 <sup>a</sup>	22.18±3.35 <sup>a</sup>	46.55±0.30 <sup>a</sup>	4.29±0.46 <sup>b</sup>	50.84±0.74 <sup>a</sup>
20—30	T <sub>4</sub>	1.53±0.09 <sup>a</sup>	23.54±1.52 <sup>a</sup>	43.32±2.03 <sup>a</sup>	5.79±1.61 <sup>b</sup>	49.12±1.46 <sup>a</sup>
	T <sub>5</sub>	1.54±0.04 <sup>a</sup>	18.21±1.55 <sup>a</sup>	38.53±1.70 <sup>ab</sup>	7.26±1.80 <sup>b</sup>	45.80±2.77 <sup>a</sup>
	T <sub>6</sub>	1.51±0.06 <sup>a</sup>	18.02±2.75 <sup>a</sup>	43.04±1.02 <sup>a</sup>	5.28±1.14 <sup>b</sup>	48.31±2.16 <sup>a</sup>
	T <sub>7</sub>	1.46±0.02 <sup>a</sup>	21.42±1.14 <sup>a</sup>	41.99±1.69 <sup>a</sup>	6.37±1.33 <sup>b</sup>	48.37±2.37 <sup>a</sup>
	T <sub>8</sub>	1.43±0.08 <sup>a</sup>	21.00±3.22 <sup>a</sup>	39.16±2.74 <sup>ab</sup>	8.41±1.75 <sup>b</sup>	47.57±1.01 <sup>a</sup>
	T <sub>9</sub>	1.38±0.08 <sup>a</sup>	22.03±2.18 <sup>a</sup>	41.68±1.31 <sup>a</sup>	6.67±1.91 <sup>b</sup>	48.35±1.34 <sup>a</sup>

注:表中数值为“平均值±标准误”;相同土壤层次,同列不同小写字母表示在不同林分类型之间差异显著( $p<0.05$ );下同。

## 2.3 凋落物和土壤水源涵养能力的综合评价及线性回归分析

2.3.1 熵权 TOPSIS 综合评价 将凋落物的自然持水量、有效拦蓄量、最大持水量和土壤的自然持水量、毛管持水量、非毛管持水量、饱和蓄水量等 7 个水源涵养能力指标进行熵权 TOPSIS 综合评价,结果见表 5。T<sub>8</sub>,CK<sub>1</sub>等种植模式凋落物与土壤的水源涵养能力相对最好,其次是 T<sub>7</sub>,T<sub>4</sub>等种植模式,再次是 T<sub>2</sub>,T<sub>5</sub>,T<sub>9</sub>,T<sub>1</sub>等种植模式,最后是 T<sub>3</sub>,CK<sub>2</sub>等种植模式。

2.3.2 线性回归分析 将各种种植模式凋落物、土壤的水源涵养指标与米老排所占比例进行线性回归分析,结果见图 5。凋落物的自然持水量、有效拦蓄量、最大持水量以及土壤的毛管持水量、非毛管持水量与米老排所占比例之间存在显著的线性回归关系(图 5)。其中,凋落物自然持水量、有效拦蓄量、最大持水量和土壤非毛管持水量分别随米老排所占比例的增加而增加,土壤毛管持水量则随米老排所占比例的增加而减少。

表 4 不同土层 11 种植模式土壤蓄水能力  
Table 4 Soil water storage capacity of 11 planting models in different soil layer

t/hm<sup>2</sup>

土层厚度/cm	林分类型	自然持水量	毛管持水量	非毛管持水量	饱和蓄水量
0—10	CK <sub>1</sub>	231.51±47.39 <sup>a</sup>	387.93±30.32 <sup>c</sup>	141.30±27.74 <sup>ab</sup>	529.23±37.87 <sup>ab</sup>
	CK <sub>2</sub>	226.88±41.64 <sup>a</sup>	437.80±17.80 <sup>ab</sup>	42.43±8.46 <sup>c</sup>	480.23±19.52 <sup>b</sup>
	T <sub>1</sub>	248.82±7.65 <sup>a</sup>	386.80±11.14 <sup>c</sup>	118.53±35.57 <sup>abc</sup>	505.33±27.66 <sup>ab</sup>
	T <sub>2</sub>	250.30±48.86 <sup>a</sup>	441.43±11.41 <sup>ab</sup>	117.97±34.40 <sup>abc</sup>	559.40±26.42 <sup>a</sup>
	T <sub>3</sub>	310.78±52.66 <sup>a</sup>	475.90±19.13 <sup>a</sup>	73.90±36.58 <sup>bc</sup>	549.80±17.55 <sup>ab</sup>
	T <sub>4</sub>	301.76±9.94 <sup>a</sup>	404.00±5.22 <sup>bc</sup>	147.73±17.79 <sup>ab</sup>	551.73±20.42 <sup>a</sup>
	T <sub>5</sub>	249.70±19.85 <sup>a</sup>	408.47±17.17 <sup>bc</sup>	104.23±4.50 <sup>abc</sup>	512.70±12.66 <sup>ab</sup>
	T <sub>6</sub>	236.87±30.82 <sup>a</sup>	428.27±14.48 <sup>abc</sup>	94.83±34.50 <sup>abc</sup>	523.10±20.48 <sup>ab</sup>
	T <sub>7</sub>	259.06±13.80 <sup>a</sup>	421.13±24.47 <sup>bc</sup>	141.67±41.19 <sup>ab</sup>	562.80±16.81 <sup>a</sup>
10—20	T <sub>8</sub>	245.46±28.08 <sup>a</sup>	396.30±6.93 <sup>bc</sup>	160.40±27.01 <sup>a</sup>	556.70±33.85 <sup>a</sup>
	T <sub>9</sub>	269.47±22.72 <sup>a</sup>	435.63±7.20 <sup>abc</sup>	104.73±27.53 <sup>abc</sup>	540.37±21.24 <sup>ab</sup>
	CK <sub>1</sub>	253.59±31.10 <sup>a</sup>	417.50±18.09 <sup>ab</sup>	118.00±11.32 <sup>ab</sup>	535.50±24.63 <sup>a</sup>
	CK <sub>2</sub>	281.00±33.57 <sup>a</sup>	442.73±19.72 <sup>ab</sup>	30.63±7.97 <sup>c</sup>	473.37±26.38 <sup>a</sup>
	T <sub>1</sub>	251.26±25.24 <sup>a</sup>	468.97±66.62 <sup>a</sup>	46.10±5.27 <sup>c</sup>	515.07±68.13 <sup>a</sup>
	T <sub>2</sub>	294.38±54.59 <sup>a</sup>	462.63±12.90 <sup>a</sup>	74.60±31.00 <sup>bc</sup>	537.23±20.19 <sup>a</sup>
	T <sub>3</sub>	318.20±41.65 <sup>a</sup>	447.00±12.96 <sup>a</sup>	79.33±28.02 <sup>bc</sup>	526.33±21.62 <sup>a</sup>
	T <sub>4</sub>	348.21±13.10 <sup>a</sup>	419.93±11.81 <sup>ab</sup>	80.57±28.52 <sup>bc</sup>	500.50±24.06 <sup>a</sup>
	T <sub>5</sub>	292.35±24.54 <sup>a</sup>	395.93±10.31 <sup>ab</sup>	84.77±20.71 <sup>abc</sup>	480.70±11.04 <sup>a</sup>
20—30	T <sub>6</sub>	268.61±46.27 <sup>a</sup>	417.80±18.26 <sup>ab</sup>	74.73±42.37 <sup>bc</sup>	492.53±25.05 <sup>a</sup>
	T <sub>7</sub>	316.74±12.59 <sup>a</sup>	437.77±19.39 <sup>ab</sup>	67.67±16.10 <sup>bc</sup>	505.43±23.15 <sup>a</sup>
	T <sub>8</sub>	279.06±38.99 <sup>a</sup>	371.37±21.30 <sup>b</sup>	150.43±21.58 <sup>a</sup>	521.80±18.09 <sup>a</sup>
	T <sub>9</sub>	326.16±17.52 <sup>a</sup>	418.13±7.12 <sup>ab</sup>	86.47±19.4 <sup>abc</sup>	504.60±12.37 <sup>a</sup>
	CK <sub>1</sub>	271.04±37.24 <sup>a</sup>	325.30±78.70 <sup>b</sup>	163.33±60.66 <sup>a</sup>	488.63±22.37 <sup>a</sup>
	CK <sub>2</sub>	293.36±27.97 <sup>a</sup>	446.20±26.66 <sup>a</sup>	44.90±15.92 <sup>b</sup>	491.10±42.52 <sup>a</sup>
	T <sub>1</sub>	300.96±26.77 <sup>a</sup>	395.00±13.04 <sup>ab</sup>	55.67±23.13 <sup>b</sup>	450.67±33.46 <sup>a</sup>
	T <sub>2</sub>	307.63±48.23 <sup>a</sup>	442.03±18.34 <sup>a</sup>	52.00±17.99 <sup>b</sup>	494.03±4.65 <sup>a</sup>
	T <sub>3</sub>	323.17±44.53 <sup>a</sup>	465.50±3.00 <sup>a</sup>	42.90±4.65 <sup>b</sup>	508.40±7.35 <sup>a</sup>
双因素方差分析	T <sub>4</sub>	357.24±15.19 <sup>a</sup>	433.23±20.33 <sup>a</sup>	57.93±16.07 <sup>b</sup>	491.17±14.59 <sup>a</sup>
	T <sub>5</sub>	279.49±18.22 <sup>a</sup>	385.33±16.98 <sup>ab</sup>	72.63±17.97 <sup>b</sup>	457.97±27.69 <sup>a</sup>
	T <sub>6</sub>	268.66±32.83 <sup>a</sup>	430.37±10.23 <sup>a</sup>	52.77±11.44 <sup>b</sup>	483.13±21.60 <sup>a</sup>
	T <sub>7</sub>	311.17±12.32 <sup>a</sup>	419.93±16.91 <sup>a</sup>	63.73±13.31 <sup>b</sup>	483.67±23.73 <sup>a</sup>
	T <sub>8</sub>	299.25±44.64 <sup>a</sup>	391.57±27.44 <sup>ab</sup>	84.10±17.46 <sup>b</sup>	475.67±10.14 <sup>a</sup>
	T <sub>9</sub>	306.62±44.10 <sup>a</sup>	416.80±13.13 <sup>a</sup>	66.70±19.12 <sup>b</sup>	483.50±13.43 <sup>a</sup>
	种植模式	0.085	0.001	<0.001	0.179
	土层厚度	0.007	0.432	0.001	<0.001
	种植模式×土层厚度	0.999	0.665	0.968	0.992

表 5 11 种幼龄林凋落物与土壤的水源涵养能力  
TOPSIS 综合评价及排序结果

Table 5 The ranking results of water conservation capacity in litter and soil of 11 planting models using an entropy weight TOPSIS model

评价对象	正理想解 欧式距离 $D^+$	负理想解 欧式距离 $D^-$	相对接近度 $C$	水源涵养能力 排序结果
CK <sub>1</sub>	0.012	0.086	0.874	2
CK <sub>2</sub>	0.091	0.007	0.076	11
T <sub>1</sub>	0.075	0.019	0.202	9
T <sub>2</sub>	0.056	0.036	0.392	5
T <sub>3</sub>	0.085	0.016	0.161	10
T <sub>4</sub>	0.039	0.052	0.572	4
T <sub>5</sub>	0.057	0.035	0.381	6
T <sub>6</sub>	0.058	0.033	0.359	7
T <sub>7</sub>	0.033	0.059	0.643	3
T <sub>8</sub>	0.010	0.089	0.901	1
T <sub>9</sub>	0.060	0.032	0.348	8

### 3 讨论

#### 3.1 不同林分类型凋落物层持水能力分析

凋落物层的持水能力主要受凋落物层生物量与持水特性共同影响<sup>[5]</sup>。本研究中不同林分之间凋落物层的自然持水量、有效拦蓄量和最大持水量等持水能力指标存在一定差异。总体上,在米老排所占比例较高的林分中相对较高并且二者之间存在显著的线性回归关系。这表明该试验林凋落层的持水能力主要受米老排所占比例影响。其原因主要为,在相同初植密度的幼龄林阶段,相比于红锥,米老排生长速率较快,能够产生较多的凋落物量;而且米老排凋落物叶表面积大,容易截留更多的水分,并且在烘干后吸水速率与



吸水量较高,这与王金悦等<sup>[23]</sup>的研究结果基本类似。此外,相较于株间与块状混交,行带混交林分凋落物层的有效拦蓄量总体较高,这是因为米老排与红锥在

混交栽植初期易形成复层结构,而行带混交降低了二者之间的种间竞争,进而有利于凋落物量的累积,使得单位面积内的凋落物层有效拦蓄量相对较高。

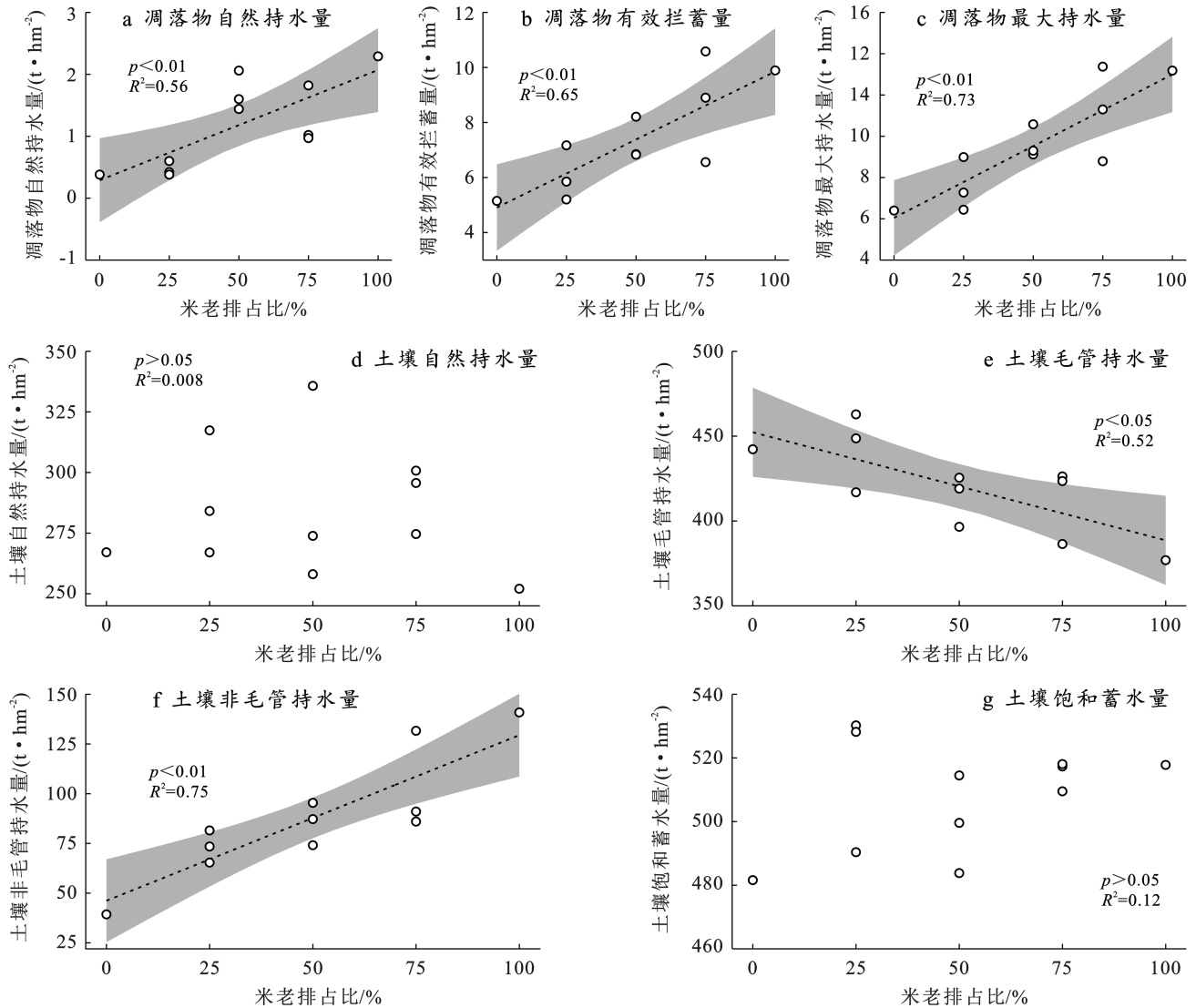


图5 凋落物、土壤水源涵养指标与米老排所占比例之间的线性拟合关系

Fig.5 Linear fitting relationship between water conservation capacity indexes of litter and soil, and percentages of *Mytilaria laosensis*

### 3.2 不同林分类型土壤层持水能力分析

土壤层的持水能力主要受土壤容重与孔隙度的影响,即容重越小,孔隙度越大,土壤的持水能力越好<sup>[17]</sup>。研究中11种植模式之间的土壤自然持水量、毛管持水量、非毛管持水量以及饱和蓄水量存在一定差异;其中,毛管持水量与非毛管持水量在不同种植模式之间差异显著,并且与米老排所占比例存在显著的线性回归关系( $p < 0.05$ ),表明试验林土壤持水能力一定程度上受米老排所占比例影响,尤其是有效持水量,这与林立文等<sup>[24]</sup>的研究结果基本类似。这可能是因为,在幼龄林阶段,相比于红锥,米老排凋落物与根系生物量显著较高,有利于维持土壤团粒结构稳定,促进非毛管孔隙的形成。例如,叶钰倩等<sup>[25]</sup>

研究发现,相较于马尾松红锥混交林,米老排格木混交林显著促进了土壤大团聚体的形成;许振欣等<sup>[26]</sup>研究发现,相比于红锥纯林,米老排纯林的土壤通透性及饱和导水率均较好。此外,不同种植模式之间土壤持水能力的差异主要发生在0—20 cm中,这主要与不同种植模式之间凋落物、根系的垂直分布差异有关<sup>[27]</sup>。

### 3.3 不同林分类型水源涵养能力评价

森林水源涵养能力受多种因素影响,且各因素之间存在交互作用<sup>[28]</sup>,通过凋落物层、土壤层的有效持水量与最大持水量进行水源涵养能力评价具有一定片面性。这是因为凋落物层与土壤层的持水量指标计算方法不同,内涵也有差异,因而各层次之间的相同指标不能通过简单相加来进行排序<sup>[7]</sup>。熵权

TOPSIS 模型能够客观评价不同层次各指标的相对重要性,通过与正、负理想解之间的欧式距离来计算相对接近度,反映评价对象的优劣,并且已在森林水源涵养能力评价中广泛应用<sup>[29]</sup>。本研究利用熵权 TOPSIS 模型将凋落物的自然持水量、有效拦蓄量、最大持水量与土壤的自然持水量、毛管持水量、非毛管持水量、饱和蓄水量纳入水源涵养能力综合评价,结果发现米老排与红锥以 3:1 混交比例进行行带混交的种植模式水源涵养能力最好,米老排纯林次之,其后是其余混交林,而红锥纯林最差。这表明混交林的水源涵养能力在一定程度上要好于各自的纯林,并且受混交比例与混交方式共同影响;其中,混交比例可能主要取决于树种特性。

## 4 结论

(1) 凋落物层的自然持水量、有效拦蓄量和最大持水量在 11 种植模式之间有一定差异,且与各种种植模式米老排所占比例显著正相关;相比于株间与块状混交,行带混交的种植模式总体具有较高的凋落物层生物量与有效拦蓄量。

(2) 土壤层的自然持水量随土层厚度增加而增加,非毛管持水量与饱和蓄水量总体变化趋势则相反;不同种植模式之间的土壤毛管持水量、非毛管持水量差异显著;其中,毛管持水量与各种种植模式米老排所占比例显著负相关,非毛管持水量则与米老排所占比例显著正相关。

(3) 通过熵权 TOPSIS 模型将各试验林凋落物的自然持水量、有效拦蓄量、最大持水量与土壤的自然持水量、毛管持水量、非毛管持水量、饱和蓄水量纳入水源涵养能力综合评价,结果表明在幼龄林阶段,米老排与红锥以 3:1 混交比例进行行带混交的种植模式水源涵养能力最好,米老排纯林次之,其后是其余混交林,而红锥纯林最差。

## 参考文献 (References)

[1] 程唱,贺康宁,俞国峰,等.干旱半干旱区不同林型人工林水源涵养能力比较研究[J].生态学报,2021,41(5):1979-1990.  
Cheng Chang, He Kangning, Yu Guofeng, et al. Comparative study on water conservation capacity of different forest types of artificial forest in arid and semi-arid area [J]. Acta Ecologica Sinica, 2021,41(5):1979-1990.

[2] 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[J].水土保持学报,2019,33(2):264-271.  
Li Yang, Wan Fuxu. Water conservation capacities of litters and soils in five typical stands in the middle

reaches of Huangpu River [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2019,33(2):264-271.

- [3] Liu Yexuan, Shi Wenjiao, Tao Fulu, 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.
- [4] 陈晶亮,杨慧,刘超,等.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[J].生态学报,2023,43(19):7987-7997.  
Chen Jingliang, Yang Hui, Liu Chao, et al. Comprehensive evaluation of the water conservation capacity of litter and soil layers in three typical forest types in the Luoshan Nature Reserve, Ningxia [J]. Acta Ecologica Sinica, 2023,43(19):7987-7997.
- [5] 赵阳,王飞,齐瑞,等.白龙江、洮河林区 5 种典型森林枯落物与土壤层水源涵养效应[J].水土保持研究,2021,28(3):118-125.  
Zhao Yang, Wang Fei, Qi Rui, et al. Water conservation effect of litter and soil layer of five typical forests in Bailongjiang and Taohe River forest of Gansu [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2021,28(3):118-125.
- [6] Neris J, Tejedor M, Rodríguez M, et al. Effect of forest floor characteristics on water repellency, infiltration, runoff and soil loss in Andisols of Tenerife (Canary Islands, Spain) [J]. Catena, 2013,108:50-57.
- [7] 张佳楠,张建军,张海博,等.晋西黄土区典型林分水源涵养能力评价[J].北京林业大学学报,2019,41(8):105-114.  
Zhang Jianan, Zhang Jianjun, Zhang Haibo, et al. Water conservation capacity of typical forestlands in the Loess Plateau of Western Shanxi Province of Northern China [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2019,41(8):105-114.
- [8] 聂泽旭,齐实,马曦瑶,等.华莹市山区典型林分水源涵养功能评价[J].水土保持学报,2020,34(2):276-282.  
Nie Zexu, Qi Shi, Ma Xiyao, et al. Evaluation of water conservation function of typical stands in mountainous areas of Huaying City [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2020,34(2):276-282.
- [9] 卢德浩,郑峰霖,古佳玮,等.不同林分类型凋落物和土壤水源涵养能力分析[J/OL].生态环境学报,2024(2024-02-06). <https://kns.cnki.net/kcms/detail/44.1661.x.20240204.1157.002.html>.  
Lu Dehao, Zheng Fenglin, Gu Jiawei, et al. Analysis and evaluation of litter and soil water conservation capacity of different stand types[J/OL]. Ecology and Environmental Sciences, 2024(2024-02-06). <http://kns.cnki.net/kcms/detail/44.1661.x.20240204.1157.002.html>.
- [10] 韩青池,孙凯,裴志永,等.干旱半干旱区典型林分持水性能比较研究[J].水土保持研究,2024,31(3):239-246.

- Han Qingchi, Sun Kai, Pei Zhiyong, et al. Comparative study on water holding performance of typical stands in arid and semi-arid areas [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2024, 31(3): 239-246.
- [11] 李鹏, 杨章旗, 颜培栋, 等. 不同混交比例马尾松和红锥人工混交林水土流失特征和土壤理化性质[J]. *中南林业科技大学学报*, 2022, 42(4): 104-116.
- Li Peng, Yang Zhangqi, Yan Peidong, et al. Quality evaluation of mixed plantations of *Pinus massoniana* and *Castanopsis hystrix* based on the soil erosion characteristics and soil physical and chemical properties [J]. *Journal of Central South University of Forestry & Technology*, 2022, 42(4): 104-116.
- [12] 姚永广, 陈奎, 骆栋卿, 等. 不同造林模式桉树人工林凋落物和土壤水源涵养能力的差异[J]. *农业研究与应用*, 2023, 36(2): 68-74.
- Yao Yongguang, Chen Kui, Luo Dongqing, et al. Difference in litter and soil water conservation capacity of eucalyptus plantations under different afforestation models [J]. *Agricultural Research and Application*, 2023, 36(2): 68-74.
- [13] 黄碧金, 赖小娜. 广东地区水源涵养林造林及质量提升关键技术[J]. *现代园艺*, 2022, 45(18): 39-41.
- Huang Bijin, Lai Xiaona. Key techniques for afforestation and quality improvement of water conservation forests in Guangdong [J]. *Contemporary Horticulture*, 2022, 45(18): 39-41.
- [14] 程思源, 陈俏艳, 乔栋, 等. 海南热带雨林不同林分凋落物储量及其持水特性[J]. *热带地理*, 2024, 44(4): 700-708.
- Cheng Siyuan, Chen Qiaoyan, Qiao Dong, et al. Litter accumulation and water retention characteristics of different stands of tropical rainforest in Hainan [J]. *Tropical Geography*, 2024, 44(4): 700-708.
- [15] 白云星, 周运超, 张薰元, 等. 马尾松针阔混交人工林凋落物和土壤水源涵养能力[J]. *林业科学*, 2021, 57(11): 24-36.
- Bai Yunxing, Zhou Yunchao, Zhang Xunyun, et al. Water conservation capacity of litter and soil in mixed plantation of *pinus massoniana* and broadleaved trees [J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2021, 57(11): 24-36.
- [16] 赵敏, 戴全厚, 严友进, 等. 喀斯特山地典型植被类型凋落物和土壤水文效应[J]. *水土保持研究*, 2024, 31(1): 241-249.
- Zhao Min, Dai Quanhou, Yan Youjin, et al. Litter and soil hydrological effects of typical vegetation types in Karst Mountains [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2024, 31(1): 241-249.
- [17] 国家林业局. 森林土壤水分—物理性质的测定: LY/T 1215—1999[S]. 北京: 中国标准出版社, 1999.
- State Forestry Administration. Forest soil moisture—Determination of physical properties: LY/T1215-1999 [S]. Beijing: Standards Press of China, 1999.
- [18] 宋学雨, 简尊吉, 王少博, 等. 松材线虫入侵对湖北三峡地区马尾松林水源涵养能力的影响[J]. *林业科学研究*, 2024, 37(1): 10-20.
- Song Xueyu, Jian Zunji, Wang Shaobo, et al. Impacts of pinewood nematode invasion on the water conservation capacity of *Pinus massoniana* forests in the Three Gorges area of Hubei Province [J]. *Forest Research*, 2024, 37(1): 10-20.
- [19] 王达未, 陈东凯, 骆汉, 等. 渭北旱塬不同树龄矮砧密植苹果园土壤水分空间分布特征[J]. *水土保持研究*, 2024, 31(6): 188-198.
- Wang Dawei, Chen Dongkai, Luo Han, et al. Spatial characteristics of soil moisture in dense planting dwarf rootstock apple orchards with different tree ages in Weibei dry highland [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2024, 31(6): 188-198.
- [20] 王敏, 冯跃华, 陶洁, 等. 基于组合赋权-TOPSIS法的引江济淮工程河南受水区节水水平评价[J]. *灌溉排水学报*, 2024, 43(3): 87-93.
- Wang Min, Feng Yuehua, Tao Jie, et al. Using Weight-TOPSIS method to evaluate water saving levels in the beneficiary areas of the Yangtze-to-Huaihe water transportation project [J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2024, 43(3): 87-93.
- [21] 杨鼎, 金娇, 李景浩, 等. 基于熵权 TOPSIS 模型的全国草原鼠害防控质量评价[J]. *草业学报*, 2024, 33(4): 221-230.
- Yang Ding, Jin Jiao, Li Jinghao, et al. Evaluation of rodent control quality in grassland in China based on an entropy weight TOPSIS model [J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2024, 33(4): 221-230.
- [22] 王先领, 姜岳, 雷贻忠, 等. 外源物质浸种对迟播油菜越冬期抗寒性及产量的影响[J]. *作物学报*, 2024, 50(5): 1271-1286.
- Wang Xianling, Jiang Yue, Lei Yizhong, et al. Effects of seed soaking with exogenous substances on late-seeded rapeseed cold resistance of during overwintering period and yield [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2024, 50(5): 1271-1286.
- [23] 王金悦, 邓羽松, 林立文, 等. 南亚热带 5 种典型人工林凋落物水文效应[J]. *水土保持学报*, 2020, 34(5): 169-175.
- Wang Jinyue, Deng Yusong, Lin Liwen, et al. Study on the hydrological effects of the litters layer from five typical plantations in south subtropics of China [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2020, 34(5): 169-175.

- Yang Guang. Study on dynamic change of landscape pattern and desertification in Yanchi County based on 3S [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2008.
- [20] 尹璐. 扎赉诺尔矿区土地利用格局及其土地退化演变分析[D]. 江苏 徐州: 中国矿业大学, 2016.
- Yin Lu. The analysis of land use and degradation changes in Zhalaier mining area [D]. Xuzhou, Jiangsu: China University of Mining and Technology, 2016.
- [21] 丁雪. 内蒙古自治区土地荒漠化动态变化研究[D]. 黑龙江 哈尔滨: 东北农业大学, 2018.
- Ding Xue. Study on dynamic change of land desertification in Inner Mongolia [D]. Harbin, Heilongjiang: Northeast Agricultural University, 2018.
- [22] 刘瑞, 朱道林. 基于转移矩阵的土地利用变化信息挖掘方法探讨[J]. 资源科学, 2010, 32(8): 1544-1550.
- Liu Rui, Zhu Daolin. Methods for detecting land use changes based on the land use transition matrix [J]. Resources Science, 2010, 32(8): 1544-1550.
- [23] 殷炜达, 苏俊伊, 许卓亚, 等. 基于遥感技术的城市绿地碳储量估算应用[J]. 风景园林, 2022, 29(5): 24-30.
- Yin Weida, Su Junyi, Xu Zhuoya, et al. Estimation and application of urban green space carbon storage based on remote sensing technology [J]. Landscape Architecture, 2022, 29(5): 24-30.
- [24] 李朝生, 丁一汇, 李泽椿, 等. 气候变化对库布齐沙漠生态环境的影响及其适应性对策初探[J]. 沙漠与绿洲气象, 2007, 1(5): 1-5.
- Li Chaosheng, Ding Yihui, Li Zechun, et al. The impacts of climate change on eco-environments in Kubuqi Desert and its adaptation countermeasures [J]. Desert and Oasis Meteorology, 2007, 1(5): 1-5.
- [25] 刘璐丹, 李晶, 柳彩霞, 等. 2000—2015 年长江经济带植被覆盖时空变化特征及影响因素分析[J]. 水土保持研究, 2021, 28(6): 330-336.
- Liu Ludan, Li Jing, Liu Caixia, et al. Analysis on the characteristics of temporal and spatial changes and influencing factors of vegetation coverage in the Yangtze River economic belt from 2000 to 2015 [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2021, 28(6): 330-336.
- ~~~~~
- (上接第 67 页)
- [24] 林立文, 邓羽松, 杨钙仁, 等. 南亚热带不同林分土壤颗粒分形与水分物理特征[J]. 生态学杂志, 2020, 39(4): 1141-1152.
- Lin Liwen, Deng Yusong, Yang Gairen, et al. Fractal and hydrophysical characteristics of soil particles in different forest stands in south subtropical China [J]. Chinese Journal of Ecology, 2020, 39(4): 1141-1152.
- [25] Ye Yuqian, Wang Hui, Luan Junwei, et al. Nitrogen-fixing tree species modulate species richness effects on soil aggregate-associated organic carbon fractions [J]. Forest Ecology and Management, 2023, 546: 121315.
- [26] 许振欣, 邓羽松, 林立文, 等. 南亚热带典型人工林土壤饱和和导水率特征及其影响因素研究[J]. 北京林业大学学报, 2021, 43(4): 100-107.
- Xu Zhenxin, Deng Yusong, Lin Liwen, et al. Characteristics of soil saturated hydraulic conductivity and its influencing factors of typical plantations in South Subtropical Zone [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2021, 43(4): 100-107.
- [27] 张益, 林毅雁, 张杰铭, 等. 北京山区典型植被枯落物和土壤层水文功能[J]. 水土保持研究, 2023, 30(4): 160-168.
- Zhang Yi, Lin Yiyan, Zhang Jieming, et al. Hydrological function of litter and soil layer of typical vegetation in Beijing mountainous area [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023, 30(4): 160-168.
- [28] 王世清, 冀正欣, 卢龙辉, 等. 张家口市林地与水源涵养功能时空变化及其耦合关系[J]. 农业工程学报, 2023, 39(10): 131-140.
- Wang Shiqing, Ji Zhengxin, Lu Longhui, et al. Spatio-temporal changes and coupling relationship between forestland and water conservation function in Zhangjiakou City of China [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2023, 39(10): 131-140.
- [29] 安金玲, 牛赟, 车宗玺, 等. 祁连山高寒山区典型植被类型水源涵养功能的灰色关联分析[J]. 中南林业科技大学学报, 2023, 43(8): 93-101.
- An Jinling, Niu Yun, Che Zongxi, et al. Grey correlation analysis of water conservation function of typical vegetation types in the alpine region of the Qilian Mountains [J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2023, 43(8): 93-101.