

网络出版时间:2013-06-20 15:28

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1390.S.20130620.1528.008.html>

不同密度油松人工林土壤特性及水源涵养功能研究

陈莉莉¹, 王得祥¹, 张宋智², 王兆杰¹, 吕婧娴¹

(1 西北农林科技大学 林学院, 陕西 杨凌 712100; 2 小陇山林业科学研究所, 甘肃 天水 741022)

【摘要】 【目的】探讨油松人工林不同林分密度下的土壤特性及水源涵养功能。【方法】以秦岭西段 30 年生油松人工林为研究对象, 设置 6 种不同林分密度(1 367, 1 861, 2 517, 2 617, 3 012 和 3 683 株/hm²)的标准地, 采集土样和枯落物样品带回室内, 测定土壤理化性质、土壤持水量、枯落物层持水特性等。【结果】林分密度对油松人工林的土壤含水率、有机质含量、体积质量、总孔隙度、土壤最大持水量、毛管持水量具有显著影响。密度为 2 617 株/hm² 的林地土壤体积质量较小(1.14 g/cm³), 总孔隙度较大(62.57%), 有机质含量较高, 为 1 367 株/hm² 林地的 1.63 倍, 土壤持水性能较好(1 251.40 t/hm²)。【结论】油松人工林在适宜密度条件下, 有利于改善土壤结构, 增强土壤肥力, 提高土壤的蓄水能力, 使林地具有更好的水源涵养功能。在秦岭西段小陇山林区, 油松人工林的林分密度为 2 617 株/hm² 左右较合理。

【关键词】 油松人工林; 林分密度; 土壤有机质; 土壤体积质量; 孔隙度; 持水量

【中图分类号】 S791.254.02

【文献标志码】 A

【文章编号】 1671-9387(2013)07-0141-09

Soil properties and water conservation function of *Pinus tabulaeformis* plantation with different stand densities

CHEN Li-li¹, WANG De-xiang¹, ZHANG Song-zhi²,
WANG Zhao-jie¹, LÜ Jing-xian¹

(1 College of Forestry, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China;

2 Xiaolongshan Research Institute of Forestry, Tianshui, Gansu 741022, China)

Abstract: 【Objective】 This paper was to discuss the soil properties and water conservation function of *Pinus tabulaeformis* plantation with different densities. 【Method】 30 year-old *P. tabulaeformis* plantation with six different stand densities(1 367, 1 861, 2 517, 2 617, 3 012 and 3 683 plant/hm²) in western Qinling mountains were taken as the research object. The soil and litter samples were collected to measure soil physical and chemical properties, soil water-holding capacity, and litter water-holding characteristics. 【Result】 Stand density had significant influence on the soil water content, organic matter content, bulk density, total porosity, soil maximal water-holding capacity and capillary water-holding capacity. *P. tabulaeformis* plantation with stand density of 2 617 plant/hm² had low soil bulk density (1.14 g/cm³), large total porosity (62.57%), high organic matter content which was 1.63 times to that of plantation with density of 1 367 plant/hm², and good soil water-holding capacity (1 251.40 t/hm²). 【Conclusion】 *P. tabulaeformis* plantation with proper density was beneficial to improve soil structure, fertility and water-holding capacity and had better water conservation function. 2 617 plant/hm² was a reasonable stand density for *P. tabulaeformis* plantation in western Qinling mountains.

* [收稿日期] 2012-09-26

[基金项目] 林业公益性行业科研专项(20100400206); 国家自然科学基金项目(31070570)

[作者简介] 陈莉莉(1987—), 女, 湖北宜昌人, 在读硕士, 主要从事森林生态学研究。E-mail: chenll8712@163.com

[通信作者] 王得祥(1966—), 男, 青海乐都人, 教授, 博士生导师, 主要从事森林生态和森林可持续经营研究。

E-mail: wangdx66@126.com

Key words: *Pinus tabulaeformis* plantation; stand density; organic matter; bulk density; porosity; water-holding capacity

水源涵养林是水土保持防护林种之一,包括原始森林、次生林和人工林^[1]。近年来,由于水资源紧缺已成为全球性问题^[2],因此,森林的水源涵养和水土保持功能越来越引起人们的重视。油松(*Pinus tabulaeformis*)是我国秦岭西段小陇山林区分布较广泛的主要造林树种之一,在涵养水源、保持水土、维护地区生态平衡和林业生产等方面起着重要作用。秦岭西段小陇山林区林地的重要性更多地体现在涵养水源、保持水土等服务功能上^[3]。造林密度是人工林群落的重要结构特征,林分密度管理是提高人工林生产力和水源涵养功能的重要途径^[4]。目前,对油松人工林林分密度的研究已取得了一些进展,如林分密度对枯落物层持水特性的影响^[5]、不同密度油松人工林生长更新状况及群落结构^[6]、不同密度油松人工林林下物种多样性研究^[3]、造林密度对油松生长和群落结构的影响^[7]、油松人工林密度与养分循环关系的研究^[8]等,这些多是研究林分密度与林木生长更新、物种多样性、群落结构及养分循环之间的相关性,而有关林分密度对油松人工林水源涵养功能等影响方面的研究还比较缺乏^[9-10]。

综上所述,本研究以秦岭西段油松人工林为研究对象,分析和探讨了林分密度对油松人工林林地水源涵养功能的影响,以期为油松人工林的可持续经营与管理提供科学依据和技术支持。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

本研究在位于秦岭西段油松林分布较为集中的小陇山林区李子园林场内进行,李子园林场是该林

区油松人工林的主要分布区,调查显示,油松面积达到 5.77 万 hm²,占人工林总面积的 81.16 %^[11]。研究区地理坐标为东经 105°42′~106°00′,北纬 34°07′~34°24′,海拔 1 410~2 200 m,坡度 36°~40°。该地区属暖温带湿润半湿润大陆性季风气候,年均气温 7~12 ℃,极端最低气温 -18.2 ℃,极端最高气温 38.3 ℃,≥10 ℃有效积温 2 484 ℃;年均降雨量 560~800 mm,其中 50%~60%的降雨集中在 7~9 月份,年均蒸发量 1 287.6~1 399.0 mm,平均相对湿度 69%,年日照时数 1 553 h,无霜期 185 d。土壤主要是山地棕色森林土,土层厚 30~60 cm,土壤质地多属壤土、轻壤土和轻粘土。

1.2 研究方法

1.2.1 样地设置及样品采集 2010-07,在全面踏查的基础上,选择林分密度具有代表性的 30 年生油松人工林作为研究对象。共设置面积为 20 m×20 m 的标准地 6 块(表 1)。各样地土壤类型、坡度、坡向、树木郁闭度基本一致,林分密度分别为 1 367, 1 861, 2 517, 2 617, 3 012 和 3 683 株/hm²。2010-08,进行土壤样品的采集和测定,避免雨天采样。在样地的坡上位、中位、下位 3 个位置各挖掘 1 个土壤剖面,按 0~20 cm(A 层)、20~40 cm(B 层)和 40~60 cm(C 层)3 个层次自下而上分别采集环刀土和袋装土。环刀土用于测定土壤的物理性质;袋装土经混匀、风干后过筛,用于测定土壤养分。同时,分别在每个样地的上、中、下坡位沿着对角线方向各取面积为 1 m×1 m 的小样方 3 个,收集样方内全部枯落物,尽量保持原状将其带回实验室,供枯落物蓄积量和持水量测定。

表 1 秦岭西段油松人工林标准地基本概况

Table 1 Overview of standard plots for *P. tabulaeformis* plantation of western Qinling mountains

样地编号 Plot number	林分密度/ (株·hm ⁻²) Stand density	平均胸径/cm Average DBH	平均树高/m Average height	海拔/m Altitude	坡度/(°) Slope degree	坡向 Slope aspect	土壤 pH Soil pH
I	1 367	11.5	9.1	1 683	37	西 W	6.4
II	1 861	11.8	9.2	1 579	38	西南 SW	6.5
III	2 517	12.6	8.8	1 604	40	西 W	7.2
IV	2 617	10.9	7.0	1 545	40	西 W	7.1
V	3 012	11.2	6.6	1 563	38	西 W	7.0
VI	3 683	8.1	6.1	1 508	40	西 W	7.1

1.2.2 土壤理化性质的测定 将采集的土样迅速带回实验室进行分析测定。土壤含水率测定用恒温箱烘干法,土壤体积质量、孔隙度测定用环刀法^[12],

土壤有机质测定采用硫酸重铬酸钾法^[13]。

1.2.3 土壤持水量的测定 土壤持水量是评价土壤涵养水源能力的重要指标,采用下式计算土壤最

大持水量和土壤毛管持水量^[14]:

$W_a = 10\,000P_a h; W_b = 10\,000P_b h。$

式中: W_a 表示土壤最大持水量(t/hm^2), W_b 表示土壤毛管持水量(t/hm^2), P_a 表示土壤总孔隙度(%), P_b 表示土壤毛管孔隙度(%), h 表示土层厚度(m)。

1.2.4 枯落物蓄积量及持水量的测定 将所收集的枯落物样品称取质量(m_1, g)后,置于 80 ℃烘箱中烘干后再次称取质量(m_2, g),用单位面积枯落物的烘干质量来表示枯落物的总蓄积量($M, t/hm^2$)。自然持水率($R_o, \%$)按下式计算:

$R_o = (m_1 - m_2) / m_2 \times 100 \%$ 。

再将烘干后的枯落物样品浸泡 24 h 后称质量(m_3, g),枯落物的最大持水率($R_m, \%$)、最大持水量($W, t/hm^2$)、最大拦蓄量($W_m, t/hm^2$)和有效拦蓄量($W_o, t/hm^2$)按下式计算^[15]:

$R_m = (m_3 - m_2) / m_2 \times 100 \%; W = MR_m;$

$W_m = (R_m - R_o)M; W_o = (0.85 R_m - R_o)M。$

1.3 数据处理

试验数据采用 Excel 2003 进行整理,并利用

SPSS 18.0 软件进行单因素方差分析和相关性分析。

2 结果与分析

2.1 不同密度油松人工林土壤含水率的变化

由表 2 可知,不同密度油松人工林 A 层土壤含水率变化为 7.04% ~ 20.75%,B 层土壤含水率变化为 5.43% ~ 16.59%,C 层土壤含水率变化为 3.67% ~ 16.37%,不同土层之间土壤含水率差异显著($P < 0.01$),A 层土壤含水率最高,明显大于 C 层土壤,B 层土壤含水率次之(图 1)。经计算,A 层土壤含水率是 C 层的 1.03~1.92 倍。油松人工林各样地土壤含水率变化为 5.38%~17.42%(表 2)。不同密度林分样地之间,土壤含水率差异极显著($P < 0.01$),表明林分密度对土壤含水率具有十分显著的影响,其土壤含水率变化特征为:林分密度越大,土壤含水率越小。导致林分密度与土壤含水率呈负相关的原因可能是,密度较大的林分林冠层的叶片表面积较大,从而使林地单位面积的蒸发量加大,导致土壤含水率降低。

表 2 不同密度油松人工林的土壤特性及持水量

Table 2 Soil properties and water-holding capacity of *P. tabulaeformis* plantation with different densities

林分密度/ (株·hm ⁻²) Stand density	土层 Soil layer	土壤 含水率/% Soil water content	土壤体积 质量/ (g·cm ⁻³) Bulk density	总孔隙度/% Total porosity	毛管 孔隙度/% Capillary porosity	非毛管孔 隙度/% Non- capillary porosity	有机质/ (g·kg ⁻¹) Organic matter	最大持水量/ (t·hm ⁻²) Maximal water- holding capacity	毛管持水量/ (t·hm ⁻²) Capillary water- holding capacity
1 367	A	20.75	1.12	54.82	42.18	12.64	57.2	1 096.40	843.60
	B	15.97	1.27	49.96	37.51	12.45	21.5	999.20	750.20
	C	15.55	1.33	45.35	35.12	10.23	17.0	907.00	702.40
	平均 Mean	17.42	1.24	50.04	38.27	11.77	31.9	1 000.87	765.40
1 861	A	18.39	1.10	58.86	43.22	15.64	56.8	1 177.20	864.40
	B	16.22	1.29	50.67	40.19	10.48	23.6	1 013.40	803.80
	C	15.94	1.30	44.38	38.26	6.12	19.7	887.60	765.20
	平均 Mean	16.85	1.23	51.30	40.56	10.74	33.4	1 026.07	811.13
2 517	A	17.15	1.08	61.50	48.35	13.15	59.6	1 230.00	967.00
	B	16.40	1.25	56.08	43.71	12.37	45.6	1 121.60	874.20
	C	16.37	1.31	52.24	41.26	10.98	27.7	1 044.80	825.20
	平均 Mean	16.64	1.21	56.61	44.44	12.17	44.3	1 132.13	888.80
2 617	A	17.12	1.03	68.85	55.08	13.77	52.9	1 377.00	1 101.60
	B	16.59	1.18	60.40	48.19	12.21	51.9	1 208.00	963.80
	C	11.03	1.22	58.46	46.57	11.89	51.4	1 169.20	931.40
	平均 Mean	14.91	1.14	62.57	49.95	12.62	52.1	1 251.40	998.93
3 012	A	11.34	1.14	60.54	49.31	11.23	68.5	1 210.80	986.20
	B	8.32	1.25	54.80	43.92	10.88	39.0	1 096.00	878.40
	C	8.05	1.26	49.79	40.03	9.76	23.7	995.80	800.60
	平均 Mean	9.24	1.22	55.04	44.42	10.62	43.7	1 100.87	888.40
3 683	A	7.04	1.20	59.96	47.50	12.46	58.1	1 199.20	950.00
	B	5.43	1.26	54.28	42.18	12.10	48.9	1 085.60	843.60
	C	3.67	1.29	48.02	37.25	10.77	23.6	960.40	745.00
	平均 Mean	5.38	1.25	54.09	42.31	11.78	43.5	1 081.73	846.20

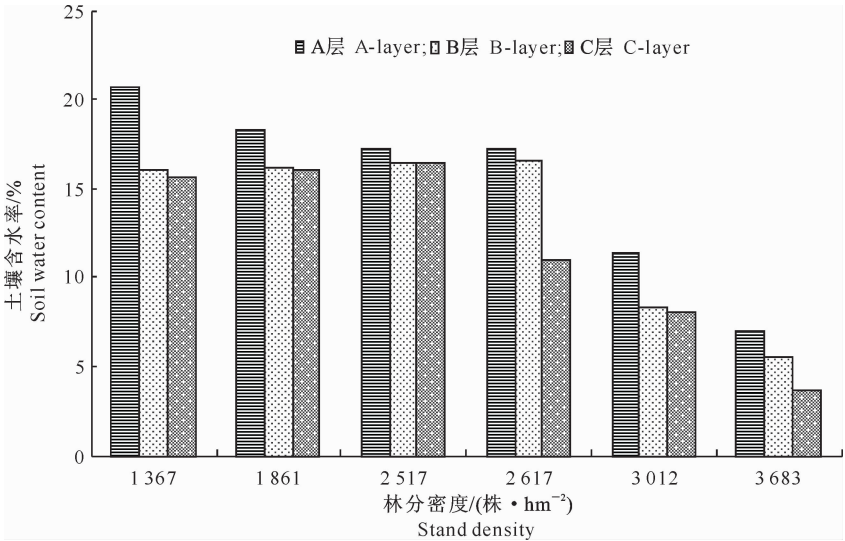


图 1 不同密度油松人工林土壤含水率特征

Fig. 1 Characteristics of soil water content in *P. tabulaeformis* plantation with different densities

2.2 不同密度油松人工林土壤有机质含量的变化

由图 2 可以看出,不同密度油松人工林土壤有机质含量均呈现出随土层加深而减少的趋势,其中 A 层土壤有机质含量最多,B 层土壤有机质含量次之,C 层土壤有机质含量急剧减少。原因是较下层土壤而言,中、上层土壤枯落物较多,土壤结构疏松,土壤肥力水平更高。由表 2 可知,不同密度油松人工林土壤有机质含量变化为 31.9~52.1 g/kg,表现

为 2 617 株/ hm^2 >2 517 株/ hm^2 >3 012 株/ hm^2 >3 683 株/ hm^2 >1 861 株/ hm^2 >1 367 株/ hm^2 。不同密度林分样地之间,土壤有机质含量存在一定差异,但差异不显著($P>0.05$)。密度为 2 617 株/ hm^2 的林地土壤有机质含量最高,为 1 367 株/ hm^2 的 1.63 倍。说明油松人工林在该密度(2 617 株/ hm^2)条件下有利于提高土壤的有机质含量。

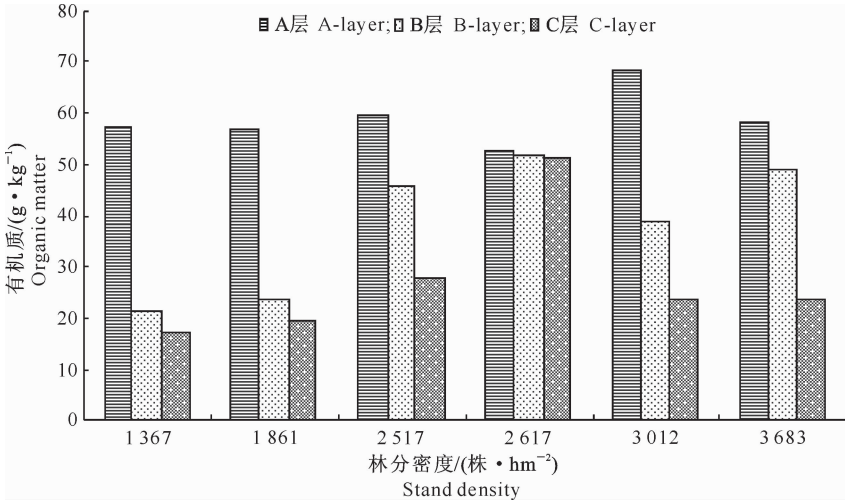


图 2 不同密度油松人工林土壤有机质特征

Fig. 2 Characteristics of soil organic matter in *P. tabulaeformis* plantation with different densities

2.3 不同密度油松人工林的土壤体积质量与孔隙度

土壤体积质量和孔隙度是反映土壤物理性质的重要参数,两者直接影响土壤的蓄水和通气性能^[16]。从表 2 可以看出,随着土层深度的增加,土壤总孔隙度(毛管孔隙度、非毛管孔隙度)都下降,而土壤体积质量增大。不同密度油松人工林的土壤体

积质量表现为:2 617 株/ hm^2 <2 517 株/ hm^2 <3 012 株/ hm^2 <1 861 株/ hm^2 <1 367 株/ hm^2 <3 683 株/ hm^2 ;土壤体积质量变化为 1.14~1.25 g/cm^3 。不同密度油松人工林的土壤总孔隙度表现为:2 617 株/ hm^2 >2 517 株/ hm^2 >3 012 株/ hm^2 >3 683 株/ hm^2 >1 861 株/ hm^2 >1 367 株/ hm^2 ;土壤总孔隙度变化为 50.04%~62.57%。研究表明,林

分密度对土壤体积质量和孔隙度具有明显影响,不同密度林分样地之间,土壤体积质量差异显著($P<0.05$),总孔隙度差异极显著($P<0.01$)。密度为 2 617 株/hm² 的林地土壤体积质量最小(1.14 g/cm³),总孔隙度最大(62.57%),说明油松人工林在该密度条件下有利于改良土壤的物理性状。

2.4 不同密度油松人工林土壤的持水性能

土壤是陆地生态系统水分涵养的主要场所,林地土壤的持水量通常占林分水源涵养量的 85% 以上,是评价森林水源涵养功能的重要指标^[17]。土壤蓄水能力越强,所接纳的降水就越多,从而可为林木生长提供更加良好的土壤水分环境。不同密度油松人工林由于土壤的物理性质存在差异,导致土壤的

持水性能亦明显不同。从图 3 可知,油松人工林各样地土壤最大持水量和毛管持水量分别为 1 000.87~1 251.40 t/hm² 和 765.40~998.93 t/hm²。不同密度油松人工林的土壤最大持水量和毛管持水量均表现为:2 617 株/hm² > 2 517 株/hm² > 3 012 株/hm² > 3 683 株/hm² > 1 861 株/hm² > 1 367 株/hm²。经方差分析可知,不同密度林分样地之间,土壤最大持水量和毛管持水量的差异均达极显著($P<0.01$)水平,说明林分密度对林地土壤持水性能具有极显著影响。密度为 2 617 株/hm² 的林地土壤持水性能最好,1 367 株/hm² 的林地土壤持水性能最差,前者的土壤最大持水量和毛管持水量分别比后者高 25.03% 和 30.51%。

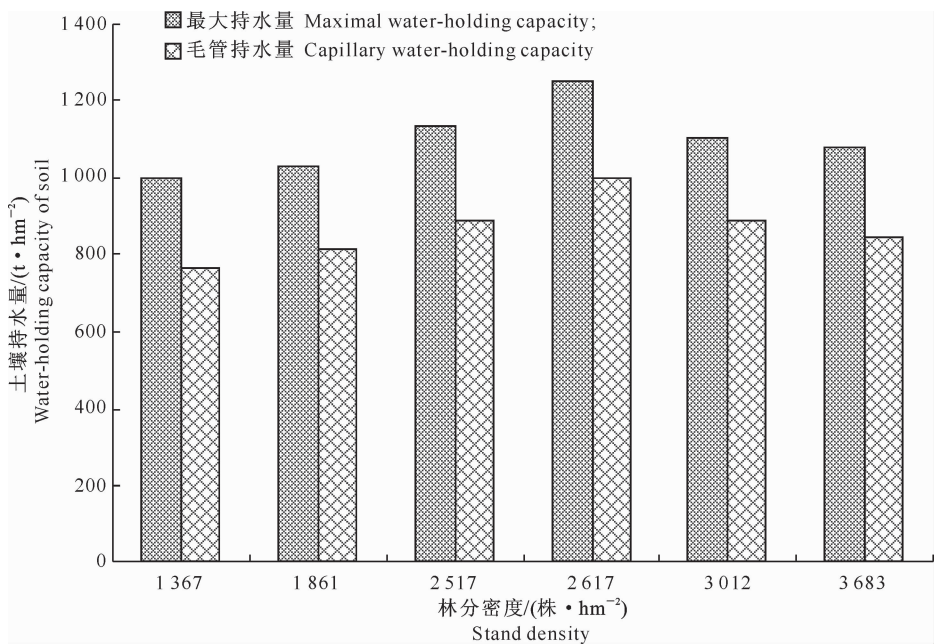


图 3 不同密度油松人工林土壤的持水性能

Fig. 3 Water-holding capacity of soil in *P. tabulaeformis* plantation with different densities

2.5 不同密度油松人工林枯落物的水源涵养效益

2.5.1 枯落物蓄积量与最大持水量 森林植被下的枯落物具有涵养水源和保持水土的作用。枯落物不仅可以很好地防止雨水和地表径流对土壤的冲刷,而且自身也有很好的吸水率和吸水量^[18]。由表 3 可知,油松人工林各样地枯落物总蓄积量变化为 6.85~15.63 t/hm²。其中,密度为 1 367,1 861 和 2 517 株/hm² 的林地枯落物总蓄积量较小,分别为 7.83,7.91 和 6.85 t/hm²,低于温带森林枯落物总蓄积量(10.27~62.5 t/hm²)^[19];密度为 3 683 株/hm² 的林地枯落物总蓄积量最大,为 15.63 t/hm²。

枯落物的持水能力多用于物质的最大持水率和

最大持水量来表示。最大持水率的大小可反映水容量的多少,枯落物最大持水量越高,吸收和过滤地表径流的作用愈强^[20]。由表 3 可以看出,不同密度林分样地之间,3 683 株/hm² 的林地枯落物持水性能最好,其最大持水率达 1 046.81%,最大持水量为 163.62 t/hm²;3 012 和 2 617 株/hm² 的林地枯落物最大持水量处于中等水平,分别为 130.70 和 90.22 t/hm²;1 367 株/hm² 的林地枯落物最大持水率最低(157.85%),且枯落物最大持水量最小,仅为 12.36 t/hm²。由计算可知,密度为 3 683 株/hm² 的林地枯落物最大持水率、最大持水量分别是 1 367 株/hm² 的 6.63 和 13.24 倍。这可能是由于密度低的林分枯落物分解速度较快^[21],从而导致其枯落物

的最大持水率、最大持水量较小。不同密度油松人工林的枯落物层最大持水率和最大持水量均表现为 $1\,367\text{ 株/hm}^2 < 1\,861\text{ 株/hm}^2 < 2\,517\text{ 株/hm}^2 <$

$2\,617\text{ 株/hm}^2 < 3\,012\text{ 株/hm}^2 < 3\,683\text{ 株/hm}^2$,林地枯落物层对降雨的拦蓄能力随着林分密度的增加而增强。

表 3 不同密度油松人工林枯落物层的蓄积量及最大持水量

Table 3 Volume and maximum water-holding capacity of litter layer in *P. tabulaeformis* plantation with different densities

林分密度/(株·hm ⁻²) Stand density	总蓄积量/(t·hm ⁻²) Total volume	最大持水率/% Maximal water-holding ratio	最大持水量/(t·hm ⁻²) Maximal water-holding capacity
1 367	7.83	157.85	12.36
1 861	7.91	183.22	14.49
2 517	6.85	223.33	15.30
2 617	14.50	622.18	90.22
3 012	13.26	985.67	130.70
3 683	15.63	1 046.81	163.62

2.5.2 枯落物层最大拦蓄量和有效拦蓄量 在自然条件下,山地森林的坡面一般不会出现较长时间的浸水条件,落到枯落物层的雨水,一部分被拦蓄,另一部分透过空隙入渗到土壤中,枯落物层的最大持水量并不代表枯落物对降雨的截留量,有效截留量才是反映枯落物对一次降水拦蓄的真实指标^[5]。由于不同林分密度枯落物的现存量不同,枯落物的最大拦蓄量和有效拦蓄量大小也存在很大差异。从图 4 可以看出,枯落物层的最大拦蓄量和有效拦蓄量均随着林分密度的增加而增大。其中,3 683

株/hm²的林地枯落物最大拦蓄量和有效拦蓄量分别高达 156.40 和 131.85 t/hm²;相对而言,1 367 株/hm² 的林地枯落物最大拦蓄量和有效拦蓄量最小,分别为 4.18 和 2.33 t/hm²。总体上,不同密度油松人工林的枯落物层最大拦蓄量和有效拦蓄量均表现为 $1\,367\text{ 株/hm}^2 < 1\,861\text{ 株/hm}^2 < 2\,517\text{ 株/hm}^2 < 2\,617\text{ 株/hm}^2 < 3\,012\text{ 株/hm}^2 < 3\,683\text{ 株/hm}^2$ 。这与林分密度对枯落物层最大持水量的影响是一致的。

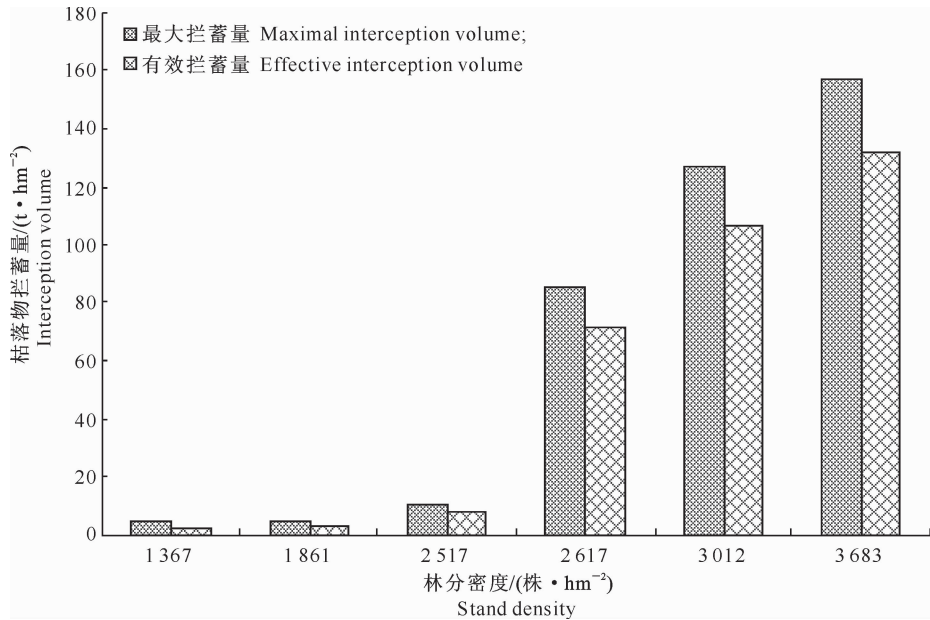


图 4 不同密度油松人工林枯落物层的最大拦蓄量和有效拦蓄量

Fig. 4 Maximum and effective interception volume of litter layer in *P. tabulaeformis* plantation with different densities

2.6 不同密度油松人工林的水源涵养功能评价

林地蓄水量主要包括枯落物层蓄水量和土壤层蓄水量,其中土壤是森林涵养水源的主体^[22]。一般根据林地总蓄水量(枯落物最大持水量+土壤最大持水量)的大小,来评价不同密度油松人工林林地的

水源涵养功能。从图 5 可以看出,油松人工林的土壤持水量远大于枯落物持水量,占林地总蓄水量的 86%以上。可见,林地的水源涵养功能以土壤层为主。不同密度林分样地之间,林地总蓄水量存在一定差异。林分密度为 $1\,367\text{ 株/hm}^2$ 时,林地总蓄水

量最小;随着林分密度的增加,林地总蓄水量逐渐增大,当林分密度为 2 617 株/hm² 时达最大;此后,随着林分密度的继续增加,林地总蓄水量呈现逐渐减小的趋势。不同密度油松人工林的林地总蓄水量表现为:2 617 株/hm² (1 341. 62 t/hm²) > 3 683

株/hm² (1 245. 35 t/hm²) > 3 012 株/hm² (1 231. 57 t/hm²) > 2 517 株/hm² (1 147. 43 t/hm²) > 1 861 株/hm² (1 040. 56 t/hm²) > 1 367 株/hm² (1 013. 23 t/hm²)。可见,密度为 2 617 株/hm² 的林地具有更好的水源涵养功能。

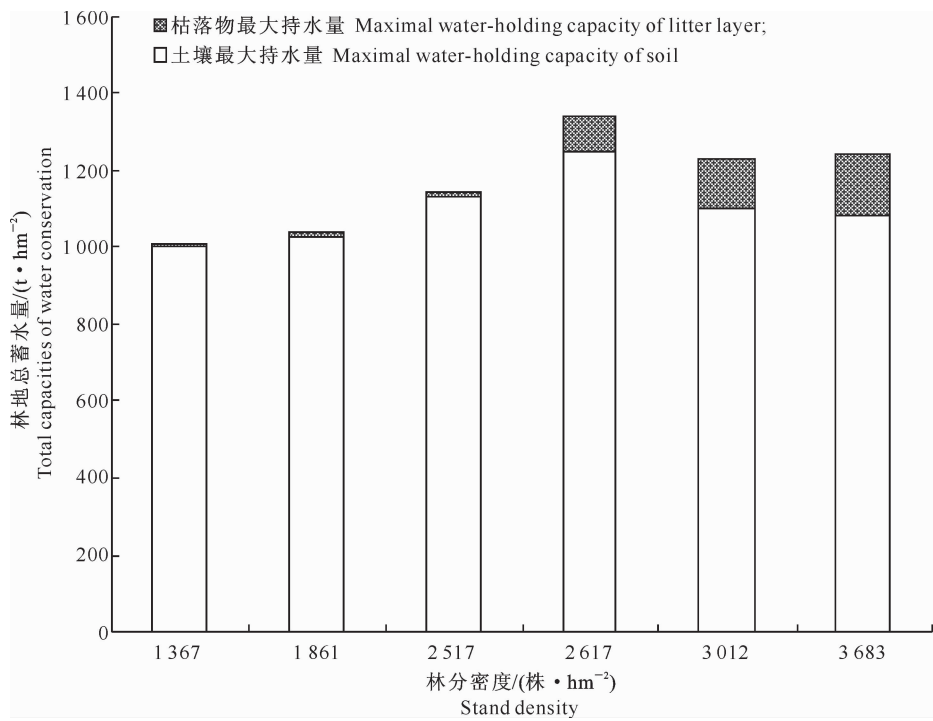


图 5 不同密度油松人工林林地的总蓄水量

Fig. 5 Total capacities of water conservation in *P. tabulaeformis* plantation with different densities

3 结论与讨论

本研究结果表明,林分密度对油松人工林的土壤含水率、有机质含量、体积质量、总孔隙度、土壤最大持水量、毛管持水量具有显著影响。不同密度林分样地之间,土壤含水率、总孔隙度、土壤最大持水量、毛管持水量的差异极显著($P<0.01$),土壤体积质量的差异显著($P<0.05$),土壤有机质含量存在一定差异,但差异性不显著($P>0.05$)。

土壤含水率随着林分密度的增大而逐渐减小,这与李世荣等^[23]对黄土半干旱区不同密度刺槐林地土壤水分动态的研究结果一致。导致林分密度与土壤含水率呈负相关的原因可能是,密度较大的林分林冠层的叶片表面积较大,从而使林地单位面积的蒸发量加大,导致土壤含水率降低。密度为2 617 株/hm² 的林地土壤有机质含量最高,为1 367 株/hm²林地的 1.63 倍,其土壤体积质量最小(1.14 g/cm³),总孔隙度最大(62.57%)。说明油松人工林在该密度(2 617 株/hm²)条件下,有利于提高土

壤的有机质含量,改良土壤的物理性状。这与康冰等^[24]研究林分密度对人工林土壤理化特性的影响取得的结果一致,即林分过密或过疏都不利于人工林群落的养分循环。

密度为 2 617 株/hm² 的林地土壤持水性能最好,1 367 株/hm² 的林地土壤持水性能最差,前者的土壤最大持水量和毛管持水量分别比后者高 25.03%和 30.51%。林地枯落物层对降雨的拦蓄能力随着林分密度的增加而增大。油松人工林的土壤持水量占林地总蓄水量的 86%以上,林地的水源涵养功能以土壤层为主。不同密度油松人工林的林地总蓄水量由大到小依次为:2 617 株/hm² > 3 683 株/hm² > 3 012 株/hm² > 2 517 株/hm² > 1 861 株/hm² > 1 367 株/hm²。可见,密度为 2 617 株/hm² 的林地具有更好的水源涵养功能。

综上所述,林分密度对油松人工林的土壤特性及水源涵养功能具有重要影响。密度为 2 617 株/hm² 的林地土壤体积质量较小,总孔隙度较大,有机质含量较高,土壤持水性能较好。油松人工林

在该密度条件下,有利于改善土壤结构,增强土壤肥力,提高土壤的蓄水能力,使林地具有更好的水源涵养功能。因此,在秦岭西段小陇山林区,油松人工林的林分密度为 2 617 株/hm² 左右较为合理。这与晋西黄土区对油松人工林提出的合适造林密度相符^[10]。

合理的林分密度不仅能够促进林木的良好生长,还可以提高油松人工林生态系统的稳定性和水源涵养功能。建议在今后的造林过程中,注重对林分密度的合理选择;同时加强对现有林的经营管理,对于过密的林分可通过疏伐减少密度,对于过疏的林分可通过人工补植以增加林分密度。林地枯落物也具有一定的水源涵养功能^[25],因此建议在现有林的经营管理过程中,注重枯落物的保护,以更好地发挥秦岭西段油松人工林涵养水源的生态效益。

王永安^[26]认为,森林的水源涵养功能取决于森林的多少、结构的密集程度等。本试验从林分密度的角度,研究了油松人工林的土壤特性及水源涵养功能,揭示了林分密度对油松人工林林地水源涵养功能的影响。不同密度油松人工林的水源涵养功能明显不同,林分过密或过疏都会影响其水源涵养功能的发挥。这与林下土壤含水率、体积质量、孔隙度、有机质含量、枯落物量等有关。对油松人工林水源涵养功能的研究,本试验只是基于 30 年生不同密度的油松人工林林分,而有关林分结构和空间配置等方面还有待进一步研究和探讨。

[参考文献]

[1] 高成德,余新晓. 水源涵养林研究综述 [J]. 北京林业大学学报,2000,22(5):78-82.
Gao C D, Yu X X. Review on researches of water conservation forests [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2000, 22 (5):78-82. (in Chinese)

[2] 姜文来. 水资源价值论 [M]. 北京:科学出版社,1998:1-17.
Jiang W L. On water resource value [M]. Beijing: Science Press, 1998:1-17. (in Chinese)

[3] 吕婧娴,王得祥,张宋智,等. 小陇山林区不同密度油松人工林下物种多样性研究 [J]. 西北农林科技大学学报:自然科学版,2010,38(11):49-55.
Lü J X, Wang D X, Zhang S Z, et al. Study on the species diversity of undergrowth in the different stand densities of *Pinus tabulaeformis* plantation of Xiaolongshan area [J]. Journal of Northwest A&F University: Natural Science Edition, 2010, 38 (11):49-55. (in Chinese)

[4] 乌云. 大青山油松人工林土壤物理特征及水分动态研究 [D]. 呼和浩特:内蒙古农业大学,2008.
Wu Y. Study on the soil physical characteristics and soil water

dynamics of *Pinus tabulaeformis* plantation of Daqing mountain [D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2008. (in Chinese)

[5] 贺 宇,丁国栋,梁文俊,等. 林分密度对枯落物层持水特性的影响 [J]. 西北农林科技大学学报:自然科学版,2012,40(4):68-72.
He Y, Ding G D, Liang W J, et al. Influence of stand density on water-holding characteristics of litter layer [J]. Journal of Northwest A&F University: Natural Science Edition, 2012, 40 (4):68-72. (in Chinese)

[6] 王 梅,张文辉. 不同密度油松人工林生长更新状况及群落结构 [J]. 西北农林科技大学学报:自然科学版,2009,37(7):75-80.
Wang M, Zhang W H. Growth, regeneration and community structure of *Pinus tabulaeformis* artificial forest under different densities [J]. Journal of Northwest A&F University: Natural Science Edition, 2009, 37(7):75-80. (in Chinese)

[7] 孙书存,高贤明,包维凯,等. 岷江上游油松造林密度对油松生长和群落结构的影响 [J]. 应用与环境生物学报,2005,11(1):8-13.
Sun S C, Gao X M, Bao W K, et al. Density effects on tree growth and community structure of Chinese Pine plantations in the upper reaches of the Min River, China [J]. Chinese Journal of Applied and Environmental Biology, 2005, 11(1): 8-13. (in Chinese)

[8] 赵广亮,王继兴,王秀珍,等. 油松人工林密度与养分循环关系的研究 [J]. 北京林业大学学报,2006,28(4):39-44.
Zhao G L, Wang J X, Wang X Z, et al. Nutrient element cycling and density effect in *Pinus tabulaeformis* plantations [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2006, 28(4):39-44. (in Chinese)

[9] 鲁绍伟,刘凤芹,余新晓,等. 华北土石山区不同造林密度的油松林结构与功能研究 [J]. 干旱区资源与环境,2007,21(9):144-149.
Lu S W, Liu F Q, Yu X X, et al. Studys on the configuration and function of different density of Pines in rocky mountain area of northern China [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2007, 21(9):144-149. (in Chinese)

[10] 张建军,毕华兴,魏天兴,等. 晋西黄土区不同密度林分的水土保持作用研究 [J]. 北京林业大学学报,2002,24(3):50-53.
Zhang J J, Bi H X, Wei T X, et al. Functions of soil and water conservation of forest stands with different densities in loess area in western Shanxi, China [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2002, 24(3):50-53. (in Chinese)

[11] 谢宏余,洪彦军. 小陇山林区人工林经营现状及存在的问题探讨 [J]. 林业科技管理,2003(3):53-54.
Xie H Y, Hong Y J. Discussion on the present situation and existing problems of Xiaolongshan area [J]. Forest Science & Technology Management, 2003(3):53-54. (in Chinese)

[12] 关继义,陈喜全. 森林土壤实验教程 [M]. 哈尔滨:东北林业大学出版社,1992.
Guan J Y, Chen X Q. Forest soil experiment course [M]. Har-

- bin; Northeast Forestry University Press, 1992. (in Chinese)
- [13] 鲍士旦. 土壤农化分析 [M]. 北京: 中国农业出版社, 2000: 30-34.
- Bao S D. Agricultural chemistry analysis of soil [M]. Beijing: China Agriculture Press, 2000: 30-34. (in Chinese)
- [14] 方伟东, 亢新刚, 赵浩彦, 等. 长白山地区不同林型土壤特性及水源涵养功能 [J]. 北京林业大学学报, 2011, 33(4): 40-47.
- Fang W D, Kang X G, Zhao H Y, et al. Soil characteristics and water conservation of different forest types in Changbai Mountain [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2011, 33(4): 40-47. (in Chinese)
- [15] 王金建, 崔培学, 刘霞, 等. 小流域水土保持生态修复区森林枯落物的持水性能 [J]. 中国水土保持科学, 2005, 3(1): 48-52.
- Wang J J, Cui P X, Liu X, et al. Water-holding capacity of litter layer for different forest vegetation in ecological restoration of small watershed [J]. Science of Soil and Water Conservation, 2005, 3(1): 48-52. (in Chinese)
- [16] 孙艳红, 张洪江, 程金花, 等. 缙云山不同林地类型土壤特性及其水源涵养功能 [J]. 水土保持学报, 2006, 20(2): 106-109.
- Sun Y H, Zhang H J, Cheng J H, et al. Soil characteristics and water conservation of different forest types in Jinyun mountain [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2006, 20(2): 106-109. (in Chinese)
- [17] 陈国华, 陈海艳, 李宝福, 等. 沿海沙地木麻黄更新迹地 6 种相思树的水源涵养功能比较 [J]. 防护林科技, 2012(2): 1-4.
- Chen G H, Chen H Y, Li B F, et al. Water conservation function of six *Acacia* spp. of *Casuarina* on slash regeneration of coastal sandy land [J]. Protection Forest Science and Technology, 2012(2): 1-4. (in Chinese)
- [18] 杨玉盛. 杉木林取代杂木林后林分水源涵养功能差异的研究 [J]. 福建林学院学报, 1992, 12(2): 125-131.
- Yang Y S. Studies on the change in water conservation function of the broadleaf stand replaced by Chinese fir stand [J]. Journal of Fujian College of Forestry, 1992, 12(2): 125-131. (in Chinese)
- [19] 徐娟. 北京山区典型森林枯落物层生态功能研究 [D]. 北京: 北京林业大学, 2010.
- Xu J. Ecological functions of forest floor in forest ecosystems in Beijing mountain area [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2010. (in Chinese)
- [20] 李奕, 曼秀玲, 蔡体久, 等. 大兴安岭山地樟子松天然林土壤水分物理性质及水源涵养功能研究 [J]. 水土保持学报, 2011, 25(2): 87-91.
- Li Y, Man X L, Cai T J, et al. Research on physical properties of soil moisture and water conservation of Scotch Pine forest in Daxingan mountains [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2011, 25(2): 87-91. (in Chinese)
- [21] 盛炜彤. 杉木林的密度管理与长期生产力研究 [J]. 林业科学, 2001, 37(5): 2-9.
- Sheng W T. A study on stand density management and long-term productive of Chinese fir (*Cunninghamia lanceolata*) plantation [J]. Scientia Silvae Sinicae, 2001, 37(5): 2-9. (in Chinese)
- [22] 蔡跃台. 不同植被类型土壤理化性质及水源涵养功能研究 [J]. 浙江林业科技, 2006, 26(3): 12-16.
- Cai Y T. Analysis on physical and chemical properties of soil and water conservation function of different vegetations [J]. Journal of Zhejiang Forestry Science and Technology, 2006, 26(3): 12-16. (in Chinese)
- [23] 李世荣, 张卫强, 贺康宁. 黄土半干旱区不同密度刺槐林地的土壤水分动态 [J]. 中国水土保持科学, 2003, 1(2): 28-32.
- Li S R, Zhang W Q, He K N. Soil moisture dynamic of the *Robinia pseudoacacia* with different density in semiarid region on the Loess Plateaus [J]. Science of Soil and Water Conservation, 2003, 1(2): 28-32. (in Chinese)
- [24] 康冰, 刘世荣, 蔡道雄, 等. 马尾松人工林林分密度对林下植被及土壤性质的影响 [J]. 应用生态学报, 2009, 20(10): 2323-2331.
- Kang B, Liu S R, Cai D X, et al. Effects of *Pinus massoniana* plantation stand density on understory vegetation and soil properties [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2009, 20(10): 2323-2331. (in Chinese)
- [25] 齐清, 李传荣, 许景传, 等. 沙质海岸不同植被类型土壤水源涵养功能的研究 [J]. 水土保持学报, 2005, 19(6): 102-105.
- Qi Q, Li C R, Xu J C, et al. Study on water conservation capacity of different vegetation types in sandy sea coastal area [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2005, 19(6): 102-105. (in Chinese)
- [26] 王永安. 论我国水源涵养林建设中的几个问题 [J]. 水土保持学报, 1989, 3(4): 74-82.
- Wang Y A. On construction problems of water- conserve forest in China [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 1989, 3(4): 74-82. (in Chinese)