

青海云杉造林密度与水源涵养功能的响应关系

黄乾, 杨海龙, 朱柱, 赵嘉玮

(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)

摘要: 以青海省大通县安门滩小流域 7 种造林密度的青海云杉人工林为研究对象, 利用浸水法、环刀法测定林下枯落物、草本层及 0—60 cm 土壤层的持水量, 定量评价不同密度的青海云杉人工林水源涵养功能。结果表明: (1) 不同造林密度下的林分枯落物最大持水量变化范围为 1.97~7.60 m³/hm², 枯落物持水量最大的造林密度为 1 725 株/hm², 造林密度为 2 300 株/hm² 的枯落物持水量最小; 不同造林密度的林下草本层持水量变化范围为 1.97~7.17 m³/hm², 林下草本层持水量最大的造林密度为 1 575 株/hm²。(2) 0—60 cm 土层的水源涵养功能与土壤物理性质、土壤渗透性及贮水性密切相关, 土壤容重的变化范围为 1.20~1.43 g/cm³, 土壤总孔隙度变化范围为 46.53%~53.30%, 土壤容重与土壤总孔隙度随造林密度变化趋势呈负相关, 密度 1 575 株/hm² 的林地具有最小的土壤容重和最大的土壤总孔隙度; 土壤渗透性能主要取决于土壤的非毛管孔隙度, 二者呈显著性相关, 密度为 1 575 株/hm² 的土壤渗透性能最强, 密度为 2 300 株/hm² 的林分土壤渗透性最差; 0—60 cm 土层的饱和蓄水量变化范围为 2 792.50~3 197.90 m³/hm², 造林密度为 1 575 株/hm² 的土壤饱和蓄水量最大。(3) 利用林地总贮水量评价水源涵养功能, 林地总贮水量大小依次为 D_{1575} (3 207.37 m³/hm²) > D_{2300} (3 164.67 m³/hm²) > D_{1900} (3 157.17 m³/hm²) > D_{1650} (3 141.12 m³/hm²) > D_{1475} (3 105.91 m³/hm²) > D_{1725} (2 998.32 m³/hm²) > D_{1350} (2 803.68 m³/hm²)。研究结果说明造林密度为 1 575 株/hm² 的青海云杉林水源涵养能力较好, 这与当地 2 m×3 m 的造林规格相匹配, 为青海黄土高原高寒区的青海云杉人工林可持续经营提供理论依据。

关键词: 黄土高寒区; 青海云杉林; 水源涵养功能; 造林密度

中图分类号: S714.7; S791.18

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2019)04-0279-08

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2019.04.039

Response Relationships Between Afforestation Densities and Water Conservation Functions of *Picea crassifolia*

HUANG Qian, YANG Hailong, ZHU Zhu, ZHAO Jiawei

(Faculty of Soil and Water Conservation, Key Laboratory of State Forestry

Administration on Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083)

Abstract: Seven afforestation densities of *Picea crassifolia* plantations were taken as the study object in this article in Anmentan small watershed, Datong County, Qinghai Province. Flooding method and ring knife method were used to determine water holding capacity of litter, herbaceous layer and 0—60 cm soil layer. This study quantified water conservation functions of *Picea crassifolia* plantation with different densities. The results showed that: (1) The maximum water holding capacities of litter varied from 1.97 m³/hm² to 7.60 m³/hm² for different afforestation densities. The afforestation density with the maximum litter water holding capacity was 1 725 plants/hm², whereas the afforestation density of 2 300 plants/hm² gave the minimum. The variation range of water holding capacities of understory herbaceous layer with different afforestation densities was as followed: 1.97~7.17 m³/hm². The maximum water holding capacity of understory herbaceous layer was 1 575 plants/hm². (2) The water conservation functions of 0—60 cm soil layer were closely related to soil physical properties, soil permeability and water storage. The variation range of soil bulk density was 1.20~1.43 g/cm³. The total porosity in soil varied from 46.53% to 53.30%. There was a negative correlation between soil bulk density and soil total porosity with afforestation density. The forest land with density of 1 575 plants/hm² had the smallest soil bulk density and maximum soil total porosity. The permeability of soil mainly depended on the non-capillary porosity of the soil. They had a significant

收稿日期: 2019-01-23

资助项目: 国家重点研发计划项目“高寒丘陵区林草植被的结构优化与功能提升技术和示范”(2017YFC0504604)

第一作者: 黄乾(1995—), 女, 硕士研究生, 主要从事水土保持、林业生态工程研究。E-mail: 309574248@qq.com

通信作者: 杨海龙(1966—), 男, 副教授, 硕士生导师, 主要从事流域管理、森林水文研究。E-mail: yang_hlong@163.com

correlation. The permeability of the soil with the density of 1 575 plants/hm² was the strongest, and the worst with the density of 2 300 plants/hm². The range of saturated water storage in 0—60 cm soil layer was between 2 792.50 to 3 197.90 m³/hm². The soil saturated water storage with afforestation density of 1 575 plants/hm² was the largest. (3) The water conservation functions were evaluated by using the total water storage of forest land. The order of total forest water storage was D_{1575} (3 207.37 m³/hm²) > D_{2300} (3 164.67 m³/hm²) > D_{1900} (3 157.17 m³/hm²) > D_{1650} (3 141.12 m³/hm²) > D_{1475} (3 105.91 m³/hm²) > D_{1725} (2 998.32 m³/hm²) > D_{1350} (2 803.68 m³/hm²). This results matched with the local afforestation specifications of 2 m × 3 m. These findings provides a theoretical basis for the sustainable management of *Piceacrassifolia* plantation in the high and cold region of Loess Plateau of Qinghai Province.

Keywords: Loess high and cold region; *Piceacrassifolia* forest; water conservation function; planting density

水源涵养功能是森林生态系统服务功能其中之一,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;在雨水充沛地区,森林水源涵养功能表现在持水和固沙保土方面^[1-3]。目前,许多学者^[4-5]利用 3S 技术和 InVEST 模型对流域尺度上的水源涵养功能进行定量评估,还有学者通过固定样地调查及长期野外监测的方式,采用水量平衡法^[6]、蓄水能力法^[7]、综合评价法^[8]和林冠截留法^[1]等方法探究林分及坡面尺度上的林地水源涵养功能。国内外关于人工林的土壤特性和水源涵养功能的研究很多,研究成果主要体现在树种选择、混交方式和林地空间配置等几个方面,主要研究对象包含落叶松(*Larix gmelinii* (Rupr.) Kuzen.)^[9]、云杉(*Picea asperata* Mast.)^[10]、马尾松(*Pinus massoniana* Lamb.)^[11]、油松(*Pinus tabulaeformis* Carr.)^[12-14]等树种,对青海云杉(*Picea crassifolia* Kom.)的水源涵养功能多从与不同林种配置^[15]以及青海云杉生长的立地条件与环境因子^[16]等角度进行研究,综合前人已有的研究,发现目前通过野外实地调查对青海云杉林的不同密度调控与其林地的土壤特性及水源涵养功能的研究尚缺。因此,本文以青海大通县高寒山区的 15~17 年的幼龄青海云杉林为主要研究对象,借鉴前人测定及评价林地水源涵养的方法,研究不同造林密度青海云杉人工林的土壤物理性质与水源涵养功能,旨在为大通县青海云杉林地可持续经营与造林密度调控提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于青海省西宁市大通县安门滩小流域(101°40′17″—101°41′12″E,36°54′57″—36°55′51″N),流域面积 1.16 km²,属于大陆性高原气候。小流域平均海拔 2 441 m,年均气温 3.9 °C,平均风速 2 m/s,年均降水量 532 mm,无霜期平均约 102 d,土壤主要为山地棕褐土和栗钙土。该小流域实行退耕还林已有 20 余年,现有树种为 16~22 年的人工林,主要乔木树种有青海云杉(*Picea crassifolia* Kom.)、白桦(*Betula*

platyphylla Suk.)、祁连圆柏(*Juniperus przewalskii* Kom.)、油松(*Pinus tabulaeformis* Carr.)、青杨(*Populus cathayana* Rehd.)、华北落叶松(*Larix principis-rupprechtii* Mayr.)等;灌木种类主要有忍冬(*Lonicera japonica* Thunb.)、柠条(*Caragana Korshinskii* Kom.)、沙棘(*Hippophae rhamnoides* Linn.)、雀儿舌头(*Leptopus chinensis* (Bunge.) Pojark.)、刺玫(*Rosa davurica* Pall.)等;草本种类主要有蒿类、风毛菊(*Saussurea japonica* (Thunb.) DC.)、鼠掌老鹳草(*Geranium sibiricum* Linn.)、早熟禾(*Poa annua* Linn.)、刺儿菜(*Cirsium setosum* (Willd.) MB.)等。

本文选择研究区域内林龄为 15~17 年的青海云杉幼龄林为研究对象,分布海拔 2 500~2 550 m,目前长势良好,有少部分枯梢或枯立木现象,研究区是青海高寒山区实行退耕还林的典型代表区域之一。

1.2 研究方法

1.2.1 样地的设置与调查 试验于 2018 年 5 月 15 日至 7 月 20 日在安门滩小流域进行,选取 7 种密度(1 350, 1 475, 1 575, 1 650, 1 725, 1 900, 2 300 株/hm²)的林龄为 15~17 年的青海云杉幼龄林样地为研究对象,7 种造林密度的样地具有基本一致的立地条件,样地面积为 20 m × 20 m。记录样地的经纬度、坡度、坡向、坡位、林草植被分布状况等样地基本信息,在各样地内进行每木检尺,记录林龄、树高、胸径、冠幅、株数等,样地基本情况见表 1。在样地对角线上布设 3 个 1 m × 1 m 草本样方及 3 个 1 m × 1 m 枯落物样方,测定林下草本及枯落物持水量。每个样地内挖 2 个 60 cm 深的土壤剖面,分为 3 层(0—20, 20—40, 40—60 cm),每层取 3 个环刀,利用常规方法测定土壤物理性质。

1.2.2 枯落物蓄积量与林下草本生物量及持水测定 在样地对角线取 3 个 1 m × 1 m 草本样方及 3 个 1 m × 1 m 枯落物样方,测量枯落物厚度,并称取样方中全部枯落物及林下草本层的鲜重量,用 80 °C 烘箱烘 8~12 h 后称其干重量,由此得到枯落物蓄积量(t/hm²)、林下草本层的生物量(t/hm²)及自然含水率(%)。将烘干后的样

品装入尼龙网袋中后置于清水中浸泡 24 h 后控干称重,测其最大持水量(m^3/hm^2)。

表 1 样地基本情况

造林密度/ (株· hm^{-2})	海拔/ m	坡度/ (°)	坡向	坡位	平均 树高/m	平均 胸径/cm	平均 冠幅/m	林龄/ a	土壤 类型	灌木层 盖度	草本层 盖度/%	枯落物 厚度/cm
1350	2542	10	N	中下	2.43	3.95	1.63×1.69	16	栗钙土	无灌木	88	1.17
1475	2519	11	NE	中下	2.28	3.64	1.68×1.65	17	栗钙土	无灌木	61	0.87
1575	2550	18	N	中下	2.09	3.52	1.59×1.60	17	栗钙土	无灌木	57	0.67
1650	2509	10	NE	中下	3.35	5.41	1.66×1.75	15	栗钙土	无灌木	81	0.57
1725	2519	15	NE	中下	2.65	5.22	1.93×1.91	17	栗钙土	无灌木	83	0.67
1900	2511	12	NE	中下	2.41	3.35	1.95×1.98	16	栗钙土	无灌木	73	0.77
2300	2496	13	NE	中下	1.29	1.38	1.01×1.03	17	栗钙土	无灌木	73	0.33

1.2.3 土壤物理性质测定 在每种密度林分的标准地均匀地挖 2 个土壤剖面。用环刀按 0—20, 20—40, 40—60 cm 分层取样,每层取 3 个重复。采用常规方法(烘干称量法和浸水烘干法称量法)测定土壤饱和和导水率、容重、孔隙度等物理性质。

1.2.4 土壤持水性测定 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^[17]为:

$$W_t = 10000P_t h$$

$$W_o = 10000P_o h$$

$$W_c = 10000P_c h$$

式中: W_t 为土壤饱和蓄水量(m^3/hm^2); W_o 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_o 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 0.6 m)。

1.2.5 数据处理与分析方法 差异性检验由 SPSS 10.0 软件分析,图表制作采用 Origin 2018 软件完成。

2 结果与分析

2.1 枯落物层及林下草本水源涵养功能

枯落物层水源涵养功能的发挥,主要取决于枯落物的类型、组成、分解状况、现存量等因素^[18],在截持降水、阻延地表径流、抑制土壤水分蒸发、增强土壤抗冲效能等方面具有非常重要的作用^[19]。7 种青海云杉造林密度的枯落物持水特性见表 2。

表 2 青海云杉不同造林密度的枯落物持水特性

造林密度/ (株· hm^{-2})	枯落物蓄积量/ ($t \cdot hm^{-2}$)	最大 持水率/%	最大持水量/ ($m^3 \cdot hm^{-2}$)
1350	1.65	243.58	4.02
1475	1.91	165.41	3.16
1575	2.00	214.82	4.30
1650	2.17	326.56	7.09
1725	2.50	303.96	7.60
1900	1.83	227.48	4.16
2300	0.72	273.10	1.97

枯落物持水能力强弱与森林类型和枯落物蓄积量有很大关系,由表 2 可知,7 种青海云杉造林密度

下的枯落物蓄积量变化范围为 0.72~2.50 t/hm^2 , 1 725 株/ hm^2 密度下的枯落物蓄积量最大,2 300 株/ hm^2 密度下的枯落物蓄积量最小;枯落物最大持水率的变化范围为 165.41%~326.56%;不同造林密度下的枯落物最大持水量变化范围为 1.97~7.60 m^3/hm^2 ,排序为: $D_{1725} > D_{1650} > D_{1575} > D_{1900} > D_{1350} > D_{1475} > D_{2300}$,密度为 1 725 株/ hm^2 的林分枯落物持水量最大,是密度为 2 300 株/ hm^2 的 3.86 倍。

从图 1 可以看出,枯落物蓄积量随着造林密度的增加呈先增加后减少的趋势;不同造林密度下的林分枯落物最大持水率变化较大,无明显变化趋势。由图 2 可以看出,枯落物最大持水量的总体变化趋势与枯落物蓄积量相近但不完全相同,这说明枯落物最大持水量主要受枯落物蓄积量与枯落物持水率影响。

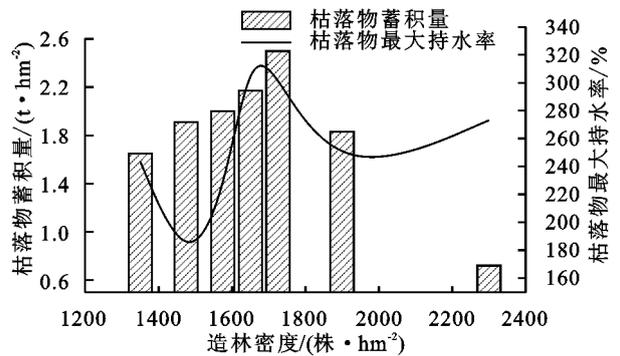


图 1 不同造林密度下的林分枯落物蓄积量与持水率

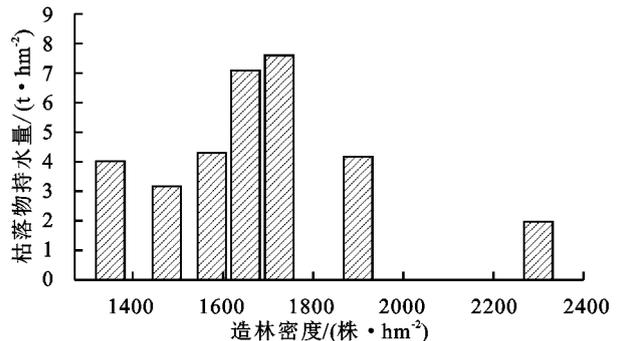


图 2 不同造林密度下的林分枯落物持水量

林下植被层是森林截持降水的第 2 个作用层,对林地水源涵养功能也有一定影响。由于调查样地中无灌木生长,在此仅对草本持水特性进行研究。不同造林密度的林下草本持水特性见表 3。

由表 3 可以看出,不同造林密度的林下草本生物量变化范围为 0.54~2.39 t/hm²,密度为 1 475 株/hm² 的林地拥有最高的草本生物量,而密度为 2 300 株/hm² 的林地草本生物量最低,这可能与造林密度关系较大;草本最大持水率的变化范围为 186.70%~362.61%,持水率最高的造林密度为 2 300 株/hm²;草本最大持水量变化范围为 1.97~7.17 m³/hm²,排序为:D₁₃₅₀>D₁₄₇₅>D₁₅₇₅>D₁₆₅₀>D₁₇₂₅>D₁₉₀₀>D₂₃₀₀,密度为 1 350 株/hm² 的林地草本持水量最大,为 7.17 m³/hm²,是密度为 2 300 株/hm² 青海云杉的林下草本持水量的 3.63 倍。

表 3 青海云杉不同造林密度的林下草本持水特性

造林密度/ (株·hm ⁻²)	草本生物量/ (t·hm ⁻²)	最大 持水率/%	最大持水量/ (m ³ ·hm ⁻²)
1350	2.16	331.09	7.17
1475	2.39	273.80	6.55
1575	1.80	287.67	5.17
1650	1.40	217.24	3.03
1725	1.57	186.70	2.92
1900	0.77	286.80	2.21
2300	0.54	362.61	1.97

由图 3 可以看出,草本生物量随密度增加总体呈降低趋势,前 5 种造林密度林下草本层生物量变化较小,1 900,2 300 株/hm² 密度的草本生物量骤减;草本持水率与草本种类有很大关系,不同密度草本最大持水率变无明显变化趋势,1 650,1 725 株/hm² 造林密度的草本持水率相较于其他密度偏低。从图 4 可以看出,随着造林密度增加,林下草本层的最大持水量呈逐渐减小趋势,草本持水量主要受草本生物量与最大持水率影响。

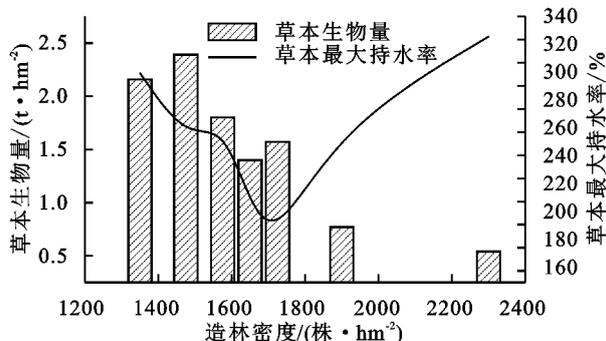


图 3 不同造林密度下的草本生物量及持水率

2.2 土壤物理性质与水源涵养功能

土壤是森林涵养水源的主体,其对大气降水的分配调节功能主要体现在对水分的静态涵养(贮水能力)和动态调节(渗透性能)上^[20],土壤静、动态调节水分功能的强弱对地表径流、地下径流、壤中流以及地下水的补给有重要影响^[21],土壤的物理性质影响着土壤的渗透功能与贮水功能,土壤水源涵养功能强

弱与土壤物理性质优劣是密切相关的。

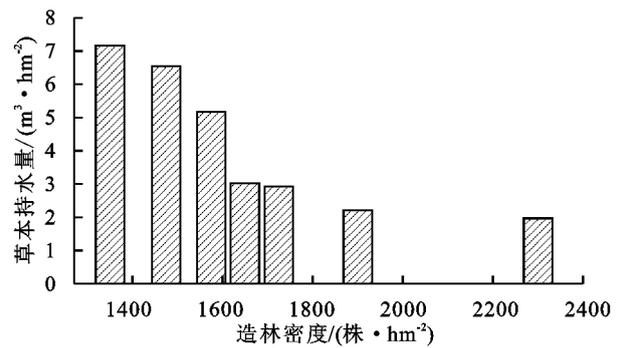


图 4 不同造林密度下的草本最大持水量

2.2.1 土壤容重及孔隙度 土壤容重和孔隙度是反映土壤物理性质的重要参数^[22],对土壤蓄水和通气性有直接作用,同时间接影响土壤肥力和作物生长状况^[23],不同深度土壤物理性质变化差异显著,同时土壤物理性质随造林密度变化也有所差异。不同造林密度下的土壤物理特性见表 4。

表 4 青海云杉不同造林密度与土壤物理性质

造林密度/ (株·hm ⁻²)	土层 深度/cm	容重/ (g·cm ⁻³)	总孔 隙度/%	毛管 孔隙度/%	非毛管 孔隙度/%
1350	0—20	1.47	45.89	43.40	2.49
	20—40	1.36	48.16	44.75	3.41
	40—60	1.45 (1.43 ^b)	45.58 (46.54 ^b)	43.51 (43.89 ^c)	2.07 (2.66 ^d)
1475	0—20	1.31	48.71	44.45	4.26
	20—40	1.19	53.46	48.76	4.70
	40—60	1.21 (1.24 ^{ab})	52.65 (51.60 ^a)	48.28 (47.16 ^{ab})	4.37 (4.44 ^{ab})
1575	0—20	1.24	53.46	48.64	4.82
	20—40	1.16	53.88	48.60	5.28
	40—60	1.19 (1.19 ^a)	52.57 (53.30 ^a)	47.60 (48.28 ^{ab})	4.97 (5.02 ^a)
1650	0—20	1.24	51.17	47.04	4.13
	20—40	1.20	54.36	49.84	4.52
	40—60	1.22 (1.22 ^a)	51.02 (52.18 ^a)	47.55 (48.14 ^{ab})	3.47 (4.04 ^{bc})
1725	0—20	1.35	48.32	45.70	2.62
	20—40	1.21	52.48	48.36	4.11
	40—60	1.31 (1.29 ^{ab})	48.59 (49.80 ^{ab})	44.73 (46.26 ^{bc})	3.86 (3.53 ^{bcd})
1900	0—20	1.17	55.12	52.01	3.11
	20—40	1.22	51.85	48.47	3.37
	40—60	1.24 (1.21 ^a)	50.58 (52.51 ^a)	47.69 (49.39 ^{ab})	2.88 (3.12 ^{cd})
2300	0—20	1.31	51.45	48.41	3.04
	20—40	1.24	54.46	51.00	3.47
	40—60	1.27 (1.28 ^{ab})	52.12 (52.68 ^a)	49.56 (49.66 ^a)	2.56 (3.02 ^{cd})

注:表中括号内数值为平均值,不同字母表示利用 Duncan 检验 7 种造林密度均值有显著差异($P < 0.05$)。

由表 4 可以看出,不同造林密度下的土壤容重之间具有极显著差异($F = 7.54, P = 9.32 \times 10^{-4} < 0.05$),

土壤容重的变化范围为 1.19~1.42 g/cm³,容重最小的造林密度为 1 575 株/hm²,而容重最大的造林密度为 1 350 株/hm²;不同造林密度下的土壤总孔隙度之间显著性差异($F=4.48, P=0.01<0.05$),总孔隙度的变化范围为 46.54%~53.30%,总排序为: $D_{1575}>D_{2300}>D_{1900}>D_{1650}>D_{1475}>D_{1725}>D_{1350}$;毛管孔隙中的水分可以长时间保持在土壤中,有利于植物根系吸收和土壤蒸发^[24],不同造林密度下的土壤毛管孔隙度之间也有显著性差异($F=4.36, P=0.01<0.05$),毛管孔隙度变化范围为 43.89%~49.66%,2 300 株/hm²造林密度下的土壤具有最大的毛管孔隙度,1 350 株/hm²密度土壤下的毛管孔隙度最小;非毛管孔隙能较快吸收降水并及时下渗,有利于水源涵养^[7],非毛管孔隙度随造林密度的变化也存在显著性差异($F=8.60, P=4.81 \times 10^{-4}<0.05$),变化范围为 2.66%~5.02%,1 575 株/hm²造林密度下的土壤具有最大的非毛管孔隙度为 5.02%,1 350 株/hm²密度下的土壤非毛管孔隙度最小。

不同造林密度下的土壤物理性质也有明显的变化趋势,由图 5 可知,不同造林密度下的土壤毛管孔隙度与总孔隙度具有大致相同的变化趋势;由图 6 可知,随着造林密度的增加,土壤非毛管孔隙度呈先增后减的变化趋势,低密度的非毛管孔隙度变化剧烈,中高密度的土壤非毛管孔隙度变化缓慢;由图 7 可知,0—60 cm 土层深度的土壤孔隙度与容重变化趋势呈负相关。

2.2.2 土壤入渗特性 土壤的入渗性能是森林水源涵养功能的重要指标之一,稳渗速率越高,说明渗透性越强。渗透性越强说明将地表径流转化为壤中流或地下径流的能力越强,渗透性好的土壤可以减少水

土流失的发生机率^[25]。7 种青海云杉造林密度下的土壤渗透速率见表 5。

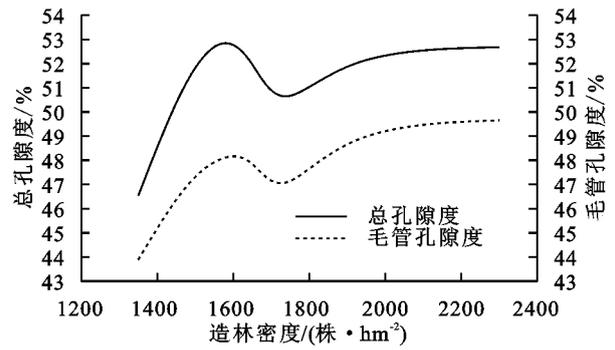


图 5 不同造林密度下的总孔隙度与毛管孔隙度关系

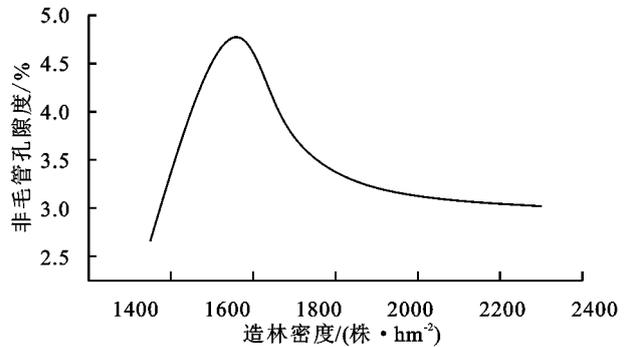


图 6 不同造林密度下的非毛管孔隙度

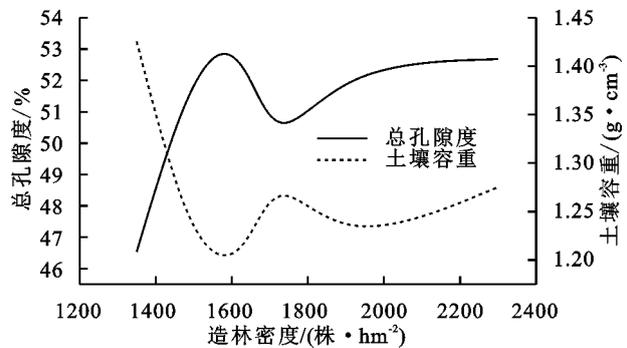


图 7 不同造林密度下的总孔隙度与容重

表 5 青海云杉不同造林密度下的土壤入渗特性

造林密度/ (株·hm ⁻²)	初渗速率/(mm·min ⁻¹)				稳渗速率/(mm·min ⁻¹)			
	0—20 cm	20—40 cm	40—60 cm	均值	0—20 cm	20—40 cm	40—60 cm	均值
1350	1.44	7.71	3.16	4.10 ^b	1.35	6.85	2.95	3.72 ^b
1475	6.87	12.45	7.72	9.02 ^{ab}	5.50	8.24	6.03	6.59 ^{ab}
1575	12.76	18.62	7.84	13.07 ^a	11.40	14.55	6.82	10.92 ^a
1650	6.03	11.04	9.34	8.80 ^{ab}	5.60	10.60	8.70	8.30 ^{ab}
1725	6.75	8.15	7.68	7.53 ^{ab}	6.23	7.15	2.90	5.43 ^{ab}
1900	2.84	3.66	2.06	2.85 ^b	2.72	3.41	1.98	2.70 ^b
2300	4.26	1.79	1.31	2.45 ^b	4.03	1.63	1.15	2.27 ^b

注:均值数据后不同字母表示利用 Duncan 检验 7 种造林密度均值显著差异($P<0.05$)。

由表 5 可知,不同造林密度下的土壤初渗速率均值差异显著($F=5.39, P=0.004<0.05$),初渗速率变化范围为 2.45~13.07 mm/min,1 575 株/hm²的土壤初渗速率在 7 种密度中最大,2 300 株/hm²密度的土壤初渗速率最小;土壤稳渗速率在不同造林密度下的差异显著($F=5.28, P=0.005<0.05$),变化范围为

2.27~10.92 mm/min,排序为 $D_{1575}>D_{1650}>D_{1475}>D_{1725}>D_{1350}>D_{1900}>D_{2300}$;渗透速率随着土层深度变化明显,0—20 cm 土层由于人工林人为活动剧烈对表层土壤产生较大影响,渗透速率低于 20—40 cm 土层,20—60 cm 土层的渗透速率皆呈降低趋势。

由图 8 可知,不同造林密度下的初渗速率与稳渗

速率变化趋势相同;土壤非毛管孔隙度随造林密度的变化与入渗速率的变化趋势相同。

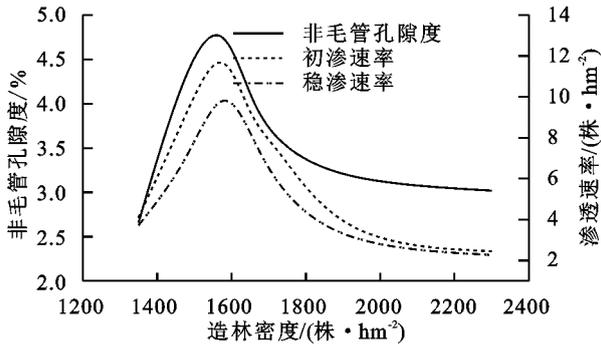


图 8 不同造林密度下的土壤渗透速率与非毛管孔隙度

2.2.3 土壤贮水特性 森林是复杂的生态系统,从而导致其林地土壤也具有复杂性^[26],土壤持水量反映林地土壤持水能力,同时也反映土壤调节和贮水的潜在能力,土壤水分直接影响树木及林下植被生长和土壤中各种物质的转化过程^[27],不同造林密度下的土壤贮水特性见表 6。

表 6 青海云杉不同造林密度下的土壤贮水特性

造林密度/ (株·hm ⁻²)	土层 深度/cm	饱和蓄水量/ (m ³ ·hm ⁻²)	毛管蓄水量/ (m ³ ·hm ⁻²)	非毛管蓄水量/ (m ³ ·hm ⁻²)
1350	0—20	917.80	867.95	49.85
	20—40	963.15	894.90	68.25
	40—60	911.55 (2792.50)	870.25 (2633.10)	41.30 (159.40)
1475	0—20	974.10	888.95	85.15
	20—40	1069.20	975.12	94.08
	40—60	1052.90 (3096.20)	965.50 (2829.57)	87.40 (266.63)
1575	0—20	1069.10	972.70	96.40
	20—40	1077.50	971.95	105.55
	40—60	1051.30 (3197.90)	951.95 (2896.60)	99.35 (301.30)
1650	0—20	1023.40	940.80	82.60
	20—40	1087.15	996.75	90.40
	40—60	1020.45 (3131.00)	951.05 (2888.60)	69.40 (242.40)
1725	0—20	966.40	913.95	52.45
	20—40	1049.55	967.25	82.30
	40—60	971.85 (2987.80)	894.65 (2775.85)	77.20 (211.95)
1900	0—20	1102.33	1040.13	62.20
	20—40	1036.93	969.50	67.43
	40—60	1011.53 (3150.80)	953.90 (2963.53)	57.63 (187.27)
2300	0—20	1029.07	968.23	60.83
	20—40	1089.23	1019.90	69.33
	40—60	1042.43 (3160.73)	991.27 (2979.40)	51.17 (181.33)

注:表中括号内数值均为合计值。

由表 6 可知,在 0—60 cm 土层中,不同密度林分的土壤饱和蓄水量的变化范围为 2 792.50~3 197.90 m³/

hm²,大小依次为:D₁₅₇₅ > D₂₃₀₀ > D₁₉₀₀ > D₁₆₅₀ > D₁₄₇₅ > D₁₇₂₅ > D₁₃₅₀;土壤毛管蓄水量的变化范围为 2 633.10~2 979.40 m³/hm²,2 300 株/hm²造林密度的土壤具有最大的土壤毛管蓄水量;土壤非毛管蓄水量是森林土壤水文调节功能的重要评价指标^[28],由表 6 可以看出,土壤的非毛管蓄水量最大的造林密度为 1 575 株/hm²,其非毛管蓄水量为 301.30 m³/hm²,而 1 350 株/hm²密度的土壤非毛管蓄水量最低为 159.40 m³/hm²。

2.3 青海云杉人工林水源涵养功能评价

林地总蓄水量主要包括枯落物及林下植被蓄水量和土壤蓄水量^[10],不同密度的林地总蓄水量见表 7。

表 7 青海云杉不同造林密度下的林地总蓄水量

造林密度/ (株·hm ⁻²)	林下草本 蓄水量/ (m ³ ·hm ⁻²)	枯落物 蓄水量/ (m ³ ·hm ⁻²)	土壤饱和 蓄水量/ (m ³ ·hm ⁻²)	林地 总蓄水量/ (m ³ ·hm ⁻²)
1350	7.17	4.02	2792.50	2803.68
1475	6.55	3.16	3096.20	3105.91
1575	5.17	4.30	3197.90	3207.37
1650	3.03	7.09	3131.00	3141.12
1725	2.92	7.60	2987.80	2998.32
1900	2.21	4.16	3150.80	3157.17
2300	1.97	1.97	3160.73	3164.67

由表 7 可知,7 种青海云杉造林密度的林地总蓄水量变化范围为 2 803.68~3 207.37 m³/hm²,排序依次为:D₁₅₇₅ > D₂₃₀₀ > D₁₉₀₀ > D₁₆₅₀ > D₁₄₇₅ > D₁₇₂₅ > D₁₃₅₀;土壤蓄水量占林地总蓄水量的 99% 以上,是林地总蓄水的主体部分。

3 讨论

青海云杉人工林枯落物蓄积量随着造林密度的增加呈先增加后减少的趋势,1 725 株/hm²的林分枯落物蓄积量最大,高于造林密度为 1 900,2 300 株/hm²的林地,这是由于高密度造林令林内竞争加剧而使林内植被发育受限导致,这与赵磊等^[29]研究的高密度杉木林中枯落物蓄积量反而较小的结果相一致;草本生物量随着造林密度的增加呈逐渐减小的趋势,这是由于高密度林地的林下植被由于土壤水与养分限制而生物量减少,这与冯宜明等^[10]的研究结果一致。同时,在研究草本生物量随造林密度变化的过程中发现,高造林密度的青海云杉林下草本层生物量相对较低,变化幅度较大且呈骤减趋势,而中低造林密度的林下草本生物量较高且变化幅度较小,这与幼龄青海云杉林还未完全郁闭、郁闭度对草本生物量影响较小有关,幼龄青海云杉林林下草本生物量主要受土壤养分及土壤水影响,故高造林密度的林下草本生物量由于造林密度的增加受土壤养分及水分制约而变化较大。

在0—60 cm土层范围内,土壤容重随着土层变化先减小后增加,与前人^[30]研究的土壤容重随土层深度增加而增加的结论不完全一致,这是由于人工林地人为活动剧烈,加之研究区域属于中坡位,存在放牧等情况对表层土壤产生较大影响,导致0—20 cm土层的土壤容重高于20—40 cm土层,20—60 cm土层的土壤容重由低逐渐增高;土壤总孔隙度与毛管孔隙度随造林密度变化的变化趋势相同,李奕等^[24]在大兴安岭山地樟子松的研究中也得出土壤毛管孔隙度和总孔隙度具有相似的变化规律;土壤容重与总孔隙度随着造林密度的变化趋势呈负相关,这与鲁绍伟等^[31]的研究结果一致。

在0—60 cm土层范围内,不同密度林分的土壤初渗速率和稳渗速率变化与非毛管孔隙度的变化基本一致,说明土壤渗透性能主要取决于土壤的非毛管孔隙度,土壤渗透性越强,说明将地表径流转化为壤中流或地下径流的能力越强,从而减轻水土流失的发生几率的能力越强,这与刘凯等^[15]的研究结果一致;土壤的饱和蓄水量与土壤总孔隙度密切相关,这是由于饱和蓄水量主要受土壤厚度及总孔隙度影响,故在土层厚度一定的情况下,总孔隙度越大,土壤饱和蓄水量越大,密度为1 575株/hm²的林分土壤具有最大的土壤饱和蓄水量。

从林地的涵养水源能力来看,土壤的蓄水量占总蓄水量的99%以上,说明土壤是森林水源涵养的主要贮水库,这与王甜等^[32]研究结果一致;造林密度为1 575株/hm²的青海云杉林地总蓄水量为3 207.37 m³/hm²,在7种造林密度中林地总蓄水量最高,具有7种密度中最佳的水源涵养功能,冯宜明等^[10]认为,云杉造林密度为1 550株/hm²可以提高林地土壤的入渗性能并增加其水源涵养能力,本文研究的青海云杉林与之相符。

为加强青海云杉人工林在青海高寒黄土区的经营管理,本文选择7种密度的青海云杉人工林,研究不同造林密度下的枯落物和林下草本层的蓄水能力、土壤物理性质、入渗特性及贮水特性,但只针对15~17年的幼龄林进行研究,对造林初期的密度调控有一定的指导意义,还未对成熟林进行研究,未来青海云杉林的抚育技术中是否需要间伐等操作还有待研究,因此增加青海云杉林龄梯度的研究对当地青海云杉人工造林技术的加强是至关重要的。

4 结论

(1)枯落物蓄积量随密度变化呈现抛物线变化趋势,变化范围为0.72~2.50 t/hm²,1 725株/hm²密度的林地枯落物蓄积量最大,7种造林密度的枯落物

最大持水量变化范围为1.97~7.60 m³/hm²,依次为:D₁₇₂₅>D₁₆₅₀>D₁₅₇₅>D₁₉₀₀>D₁₃₅₀>D₁₄₇₅>D₂₃₀₀;草本生物量随着造林密度的增加呈逐渐减小趋势,高造林密度的幼龄青海云杉林下草本生物量受土壤养分及水分制约而变化较大,在幼龄青海云杉林未郁闭期土壤因素成为影响林下草本生物量的主要因素,草本最大持水量变化范围为1.97~7.17 m³/hm²,排序为:D₁₃₅₀>D₁₄₇₅>D₁₅₇₅>D₁₆₅₀>D₁₇₂₅>D₁₉₀₀>D₂₃₀₀。

(2)在0—60 cm土层中,土壤容重、总孔隙度、毛管孔隙度及非毛管孔隙度均随造林密度的变化差异显著($P<0.05$),土壤容重与总孔隙度随着造林密度的变化呈负相关的变化趋势,土壤容重变化范围为1.19~1.42 g/cm³,依次为D₁₃₅₀>D₁₇₂₅>D₂₃₀₀>D₁₄₇₅>D₁₆₅₀>D₁₉₀₀>D₁₅₇₅;总孔隙度变化范围为46.53%~53.30%,依次为D₁₅₇₅>D₂₃₀₀>D₁₉₀₀>D₁₆₅₀>D₁₄₇₅>D₁₇₂₅>D₁₃₅₀;随着造林密度的变化,土壤毛管孔隙度和总孔隙度具有基本相同的变化规律,毛管孔隙度变化范围为43.89%~49.66%,密度为2 300株/hm²的林分具有最大的毛管孔隙度,土壤保水性能最好;密度为1 575株/hm²的林分非毛管孔隙度最大,具有最好的土壤通气性与透水性。

(3)在0—60 cm土层中,土壤的初渗速率与稳渗速率随造林密度的变化差异均显著($P<0.05$),随造林密度增加,土壤入渗速率的变化呈先增加后减小的趋势,土壤初渗速率的变化范围为2.45~13.07 mm/min,稳渗速率的变化范围为2.27~10.92 mm/min,初渗速率与稳渗速率变化趋势相同,排序为D₁₅₇₅>D₁₆₅₀>D₁₄₇₅>D₁₇₂₅>D₁₃₅₀>D₁₉₀₀>D₂₃₀₀;随造林密度变化土壤入渗速率与土壤非毛管孔隙度具有相同的变化趋势,土壤渗透性能强弱主要受土壤非毛管孔隙度影响,造林密度为1 575株/hm²的青海云杉林渗透性能在7种造林密度中最强,其将地表径流转化为壤中流或地下径流的能力及减轻水土流失的发生几率能力最强。

(4)0—60 cm土层的土壤饱和蓄水量变化趋势与土壤总孔隙度相同,其随造林密度变化范围为2 792.50~3 197.90 m³/hm²,依次表现为D₁₅₇₅>D₂₃₀₀>D₁₉₀₀>D₁₆₅₀>D₁₄₇₅>D₁₇₂₅>D₁₃₅₀;土壤毛管蓄水量变化范围为2 633.10~2 979.40 m³/hm²,2 300株/hm²造林密度的土壤毛管蓄水量最大;非毛管蓄水量变化范围为231.95~381.30 m³/hm²,依次表现为D₁₅₇₅>D₁₃₅₀>D₁₄₇₅>D₁₉₀₀>D₂₃₀₀>D₁₆₅₀>D₁₇₂₅。

(5)依据土壤饱和蓄水量、枯落物蓄积量及林下草本生物量来计算林地总蓄水量以描述林地水源涵养功能,土壤饱和蓄水量是林地总蓄水量的99%,是森林水源涵养的主要组成部分,7种造林密度的青海云杉林地总蓄水排序为D₁₅₇₅(3 207.37 m³/hm²)>D₂₃₀₀(3 164.67

$\text{m}^3/\text{hm}^2) > D_{1900} (3\ 157.17\ \text{m}^3/\text{hm}^2) > D_{1650} (3\ 141.12\ \text{m}^3/\text{hm}^2) > D_{1475} (3\ 105.91\ \text{m}^3/\text{hm}^2) > D_{1725} (2\ 998.32\ \text{m}^3/\text{hm}^2) > D_{1350} (2\ 803.68\ \text{m}^3/\text{hm}^2)$ 。

综上所述,依据枯落物层、林下草本层的持水量和土壤层的蓄水量,以及土壤入渗能力评价林龄为 15~17 年的不同造林密度下的青海云杉林水源涵养功能,密度为 $1\ 575\ \text{株}/\text{hm}^2$ 的青海云杉林具有 7 种密度中最好的水源涵养能力,该密度相当于当地 $2 \times 3\ \text{m}^3$ 的造林规格。建议在今后青海云杉造林时将合理造林密度考虑进造林技术中,以便更好地发挥林地的水源涵养能力。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 纪金华,章永江,张一平,等.哀牢山常绿阔叶林水源涵养功能及其在应对西南干旱中的作用[J].生态学报,2012,32(6):1692-1702.
- [3] 陈东立,余新晓,廖邦洪.中国森林生态系统水源涵养功能分析[J].世界林业研究,2005,18(1):49-54.
- [4] 王玉纯,赵军,付杰文,等.石羊河流域水源涵养功能定量评估及空间差异[J].生态学报,2018,38(13):4637-4648.
- [5] 丁程锋,张绘芳,李霞,等.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[J].生态学报,2017,37(11):3733-3743.
- [6] 张彪,李文华,谢高地,等.北京市森林生态系统的水源涵养功能[J].生态学报,2008,28(11):5619-5624.
- [7] 吴丹,邵全琴,刘纪远.江西泰和县森林生态系统水源涵养功能评估[J].地理科学进展,2012,31(3):330-336.
- [8] 莫菲,李叙勇,贺淑霞,等.东灵山林区不同森林植被水源涵养功能评价[J].生态学报,2011,31(17):5009-5016.
- [9] 王卫军,赵婵璞,任仙,等.华北落叶松人工林林分密度对土壤持水能力的影响[J].中南林业科技大学学报,2013,33(10):95-98.
- [10] 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.
- [11] 陈绍栓,许建伟,吴载璋,等.不同强度疏伐改造对马尾松林分水源涵养功能时空格局的影响[J].生态学报,2017,37(20):6753-6760.
- [12] 曹云,杨劼,宋炳煜,等.人工抚育措施对油松林生长及结构特征的影响[J].应用生态学报,2005,16(3):397-402.
- [13] 陈莉莉,王得祥,张宋智,等.不同密度油松人工林土壤特性及水源涵养功能研究[J].西北农林科技大学学报(自然科学版),2013,41(7):141-149.
- [14] 郭梦娇,朱江,程小琴等.辽河源不同林龄油松林水源涵养能力研究[J].水土保持学报,2016,30(3):279-284.
- [15] 刘凯,贺康宁,田赟,等.青海高寒山区 5 种林分的土壤特性及其水源涵养功能[J].水土保持学报,2017,31(3):141-146.
- [16] 王彬.祁连山典型阴坡青海云杉林生态水文特征研究[D].北京:中国林业科学研究院,2017.
- [17] 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.
- [18] 刘世荣,温光远,王兵,等.中国森林生态水文生态功能规律[M].北京:中国林业出版社,1996:156-159.
- [19] 马维伟,王辉,王跃思,等.甘南杂海泥炭沼泽地退化过程土壤特征和水源涵养功能的变化[J].自然资源学报,2014,29(9):1532-1539.
- [20] 胡阳,邓艳,蒋忠诚,等.岩溶坡地不同植被类型土壤水分入渗特征及其影响因素[J].生态学杂志,2016,35(3):597-604.
- [21] 刘宇,郭建斌,邓秀秀,等.秦岭火地塘林区 3 种土地利用类型的土壤潜在水源涵养功能评价[J].北京林业大学学报,2016,38(3):73-80.
- [22] 许炯心,孙季.无定河水土保持措施减沙效益的临界现象及其意义[J].水科学进展,2006,17(5):611-620.
- [23] 张社奇.黄土高原油松、刺槐人工林土壤生态系统的功能特征研究[D].陕西 杨凌:西北林学院,2004.
- [24] 李奕,满秀玲,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):87-96.
- [25] 徐小牛,邓文鑫,张赟齐,等.安徽老山亚热带常绿阔叶林不同林龄阶段土壤特性及其水源涵养功能的变化[J].水土保持学报,2009,23(1):177-181.
- [26] Whakey W R, Riseley B, Leeds-harrism P B, et al. Structural differences between bulk and rhizosphere soil[J]. European Journal of Soil Science, 2004, 56(3):353-360.
- [27] 林大仪.土壤学[M].北京:中国林业出版社,2002:244-245.
- [28] 马雪华.森林水文学[M].北京:中国林业出版社,1993:124-126.
- [29] 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):203-246.
- [30] 丁访军,王兵,钟洪明,等.赤水河下游不同林地类型土壤物理特性及其水源涵养功能[J].水土保持学报,2009,23(3):179-231.
- [31] 鲁绍伟,陈波,潘青华,等.北京山地不同密度侧柏人工林枯落物及土壤水文效应[J].水土保持学报,2013,27(1):224-229.
- [32] 王甜,康峰峰,韩海荣,等.山西太岳山油松人工幼龄林水源涵养能力对密度调控的响应[J].水土保持学报,2015,29(2):133-138.