

DOI: 10.5846/stxb201811292597

林莎,王莉,李远航,陈梦飞,贺康宁.青藏高原东北缘黄土区典型立地人工林分土壤水分特性研究.生态学报,2019,39(18): - .

Lin S, Wang L, Li Y H, Chen M F, He K N. Soil moisture characteristics of typical standing artificial forests in loess area of the northeastern Tibetan Plateau. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(18): - .

青藏高原东北缘黄土区典型立地人工林分土壤水分特性研究

林 莎, 王 莉, 李远航, 陈梦飞, 贺康宁*

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; 北京市水土保持工程技术研究中心; 林业生态工程教育部工程研究中心, 北京 100083

摘要:为探讨青藏高原东北缘黄土区典型立地人工林分的土壤水分特性及耗水特性,本研究以青海云杉林地和祁连圆柏林地作为研究对象,对其土壤持水特性、土壤渗透特性、土壤水分动态和土壤耗水特性进行综合分析。研究表明:(1)在相同土壤水吸力作用下,青海云杉林地的持水性比祁连圆柏好,荒草地的持水性比林地差。(2)青海云杉林地的土壤渗透性总体优于祁连圆柏,荒草地的土壤渗透性最差。相同坡向,上坡位的土壤渗透性小于下坡位。(3)青海云杉林地土壤水分条件总体优于祁连圆柏,而荒草地土壤水分条件优于林地;半阴坡林地土壤含水量随坡位由上至下逐渐升高。(4)生长季期间,青海云杉林地平均耗水量大于祁连圆柏,而荒草地耗水量远小于林地。综上,青海云杉林地的土壤水分特性整体优于祁连圆柏林地,且二者的土壤水分状况都比较好,并未出现土壤干层、土壤水分过度消耗等现象,青海云杉和祁连圆柏在研究区的配置是合理的,可以作为当地的水源涵养树种。

关键词:黄土区;土壤水分特性;林地耗水特性

Soil moisture characteristics of typical standing artificial forests in loess area of the northeastern Tibetan Plateau

LIN Sha¹, WANG Li, LI Yuanhang, CHEN Mengfei, HE Kangning^{1,*}

School of Soil and Water Conservation, Key Laboratory of State Forestry Administration on Soil and Water Conservation, Beijing Engineering Research Center of Soil and Water Conservation, Engineering Research Center of Forestry Ecological Engineering of Ministry of Education, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China

Abstract: To investigate the characteristics of soil moisture and water consumption of typical standing artificial forests in the loess area of the northeastern margin of the Qinghai-Tibet Plateau, the *Picea crassifolia* and *Juniperus przewalskii* Kom. lands were examined in this study. A comprehensive analysis of their soil water-holding characteristics, soil permeability characteristics, soil moisture dynamics, and soil water consumption characteristics was performed. The results showed that: 1) under the same soil water suction conditions, the water holding capacity of the *P. crassifolia* land was better than that of the *J. przewalskii* Kom. land, and the water holding capacity of the desert grassland was worse than that of the forest land; 2) the soil permeability of the *P. crassifolia* land was generally better than that of the *J. przewalskii* Kom. land, and the soil permeability of the desert grassland was the worst. The soil permeability of the upper position was less than that of the lower position on the same slope; 3) the soil moisture condition of the *P. crassifolia* land was better than that of the *J. przewalskii* Kom. land, and the soil moisture condition of the desert grassland was better than that of the forest land. The soil water

基金项目:国家重点研发计划重点专项(2017YFC0504604)

收稿日期:2018-11-29; 网络出版日期:2019-00-00

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

content of the forest on the west-facing slopes gradually increased with a decrease in slope height; 4) during the growing season, the average water consumption of the *P. crassifolia* land was more than that of the *J. przewalskii* Kom. land, whereas the water consumption of the desert grassland was much lower than that of the woodland. In summary, the soil moisture characteristics of the *P. crassifolia* land were better than those of the *J. przewalskii* Kom. land, and the soil moisture statuses for both of them were good. The phenomena of excessive soil water consumption and dry layer of soil were not observed. The configuration of *P. crassifolia* and *J. przewalskii* Kom. in the study area is reasonable and they can be used as tree species for local water conservation.

Key Words: Loess area; soil moisture characteristics; water consumption characteristics of forest land

青藏高原东北缘黄土区地处干旱半干旱气候区,降水量少且分配不均,生态环境十分脆弱。退耕还林还草工程的实施,使黄土区的水土流失得到了极大改善,但不考虑土壤水分条件,盲目进行人工植被建设可能会导致土壤干层,生态环境恶化^[1]。土壤水分作为该区域限制植被生长的关键因子、流域水量平衡和区域水文循环的重要因素^[2-3],具有重大的研究价值。当前,国内对该区域土壤水分时空分布^[4-5]、土壤水分动态变化^[6-7]及土壤水分消耗^[8]等方面做出了大量研究,但结合土壤持水特性和渗透特性对土壤水分特性进行综合分析的研究相对较少^[9]。林地土壤水分特性受植被、气候、地形及土壤等多重因素影响,是水分循环过程中林分结构与功能的综合体现^[10]。研究人工林地土壤水分特性,对合理利用土壤水资源、提高林地含蓄水源功能具有重要意义。

本研究选择青藏高原东北缘黄土区典型林分——青海云杉(*Picea crassifolia*)和祁连圆柏(*Juniperus przewalskii* Kom.)作为研究对象,在生长季期间对林地土壤水分进行定位观测,结合林地土壤持水特性和渗透特性展开分析,研究该区域典型立地人工林分土壤水分特性及耗水特性,验证该区域典型林分是否适应当地水分条件,能否有效拦蓄天然降雨、维持水分收支平衡、作为当地的水源涵养林,从而为该区域的生态建设结构优化提供理论依据。

1 研究区概况

研究区位于青海省大通回族土族自治县,属于黄土高原与青藏高原的过渡区。该区海拔 2280—4622m,属于大陆性高原气候。全县年平均温度为 2.8℃,无霜期 97d,年降水量 450—820mm 不等,多年平均降雨量为 508mm。降水的地区差异较大,从东南到西北降雨量逐渐增加。降水的季节分布也很不均匀,多集中在 7、8、9 三个月内。植物生长季(5—9 月)的降雨达 400—600mm,约占全年降水量的 87%左右,雨热基本同季。全县年平均蒸发量为 1290mm,湿润指数的变化范围为 0.56—1.32。土壤的主要成土母质为黄土和黄土状物质,另有少量坡积母质、残积母质、第四纪红土洪积物和近代冲积物等。大通县的主要造林树种包括青海云杉(*Picea crassifolia*)、祁连圆柏(*Juniperus przewalskii* Kom.)、青杨(*Populus cathayana*)、华北落叶松(*Larix principis-rupprechtii*)和柠条(*Caragana intermedia*)等。

2 研究方法

2.1 样地选取与调查

根据研究区青海云杉、祁连圆柏林地的分布情况,考虑坡位和坡向因素,共选择土壤母质为黄土的 6 个青海云杉固定样地、6 个祁连圆柏固定样地和 1 个荒草地对照样地,样地规格为 20m×20m。样地基本情况见表 1。

2.2 土壤持水特性

在各样地内沿对角线挖取三个深度为 60cm 的土壤剖面,每 20cm 为一个取样层,分别用 TWS-55 型渗透仪专用环刀、100cm³环刀和塑封袋取样,每层 3 个重复。将 100cm³环刀土样用于环刀法测定土壤容重和田间

持水量,取塑封袋土样用激光粒度仪测定土壤颗粒组成,测定结果见表 2。按各样地土壤容重将塑封袋土样按容重回填入离心机专用环刀,把环刀放入水平盛水容器中 24h,水面低于环刀高度,使水分从环刀下部被吸渗进入土壤。使用离心机法测定土壤水分特征曲线^[11]。

表 1 试验样地基本情况
Table 1 Basic information of experimental sample plots

林分类型 Stand type	坡向坡位 Slope direction and position	坡度 Gradient/(°)	树高 height/m	胸径/基径 diameter/cm	密度 Density /(株/hm ²)	草本盖度 Coverage/%	林下植被 Undergrowth vegetation
青海云杉 <i>Picea crassifolia</i>	阴坡上坡	11	2.28	3.64	1475	60.89	早熟禾、鼠掌老鹳草、白莲蒿、披碱草、刺儿菜、 飞蓬、风毛菊、黑麦草、飞廉等
	阴坡中坡	18	2.09	3.52	1575	57.22	早熟禾、白莲蒿、鼠掌老鹳草、刺儿菜、披碱草、 风毛菊、乳白香青、棘豆、飞廉等
	阴坡下坡	10	3.35	5.41	1700	77.22	早熟禾、鼠掌老鹳草、披碱草、黄香草木樨、刺儿 菜、白莲蒿、山野豌豆、蒲公英等
	半阴坡上坡	12	2.22	3.27	2000	86.45	早熟禾、鼠掌老鹳草、白莲蒿、披碱草、刺儿菜、 飞蓬、风毛菊、沙蒿、飞廉等
	半阴坡中坡	10	2.43	3.95	1350	88.33	早熟禾、鼠掌老鹳草、披碱草、醉马草、苜蓿、风 毛菊、棘豆、飞蓬、刺儿菜等
	半阴坡下坡	15	3.65	5.52	1725	83.5	早熟禾、披碱草、鼠掌老鹳草、白莲蒿、刺儿菜、 苜蓿、狗娃花、黄香草木樨等
祁连圆柏 <i>Juniperus przewalskii</i>	阴坡上坡	20	1.68	12.44	1725	44.44	白莲蒿、早熟禾、冷蒿、老鹳草、飞蓬、狗娃花、刺 儿菜、风毛菊等
Kom.	阴坡中坡	台地	1.48	13.93	1900	59.71	白莲蒿、针茅、冷蒿、火绒草、风毛菊、鼠掌老鹳 草、飞蓬、披碱草、披针叶黄花等
	阴坡下坡	台地	1.45	14.19	1800	70.25	刺儿菜、鼠掌老鹳草、风毛菊、早熟禾、白莲蒿、 狗娃花、太阳花、披碱草等
	半阴坡上坡	20	1.68	11.88	1100	84.2	白莲蒿、针茅、野豌豆、冷蒿、火绒草、风毛菊、鼠 掌老鹳草、飞蓬、披针叶黄花等
	半阴坡中坡	台地	1.37	12.98	1650	78.44	白莲蒿、冷蒿、沙蒿、飞廉、早熟禾、狗娃花、风毛 菊、鼠掌老鹳草、刺儿菜、飞蓬等
	半阴坡下坡	15	1.55	14.39	1475	71.11	披碱草、刺儿菜、鼠掌老鹳草、风毛菊、早熟禾、 白莲蒿、狗娃花、太阳花、醉马草等
荒草地 CK	半阴坡上坡	20	\	\	\	87	早熟禾、白莲蒿、鼠掌老鹳草、播娘蒿、苜蓿、草 木樨、刺儿菜、披碱草、乳白香青等

以下青海云杉(*Picea crassifolia*)、祁连圆柏(*Juniperus przewalskii* Kom.)和荒草地(CK)分别用 P、J 和 CK 表示;阴坡上坡、阴坡中坡、阴坡下坡、半阴坡上坡、半阴坡中坡、半阴坡下坡分别用 UPNFS、MPNFS、LPNFS、UPWFS、MPWFS、LPWFS 表示

表 2 各样地不同土层土壤颗粒组成及容重
Table 2 Soil particle composition and bulk density of different soil layers in sample plots

土层深度/cm Soil depth	样地 Sample plot	黏粒/% Clay	粉粒/% Silt	砂粒/% Sand	容重/(g/cm ³) Bulk density	田间持水量/% Field moisture capacity
0—20	PUPNFS	20.18	27.83	51.99	1.31	33.93
20—40		22.97	31.14	45.89	1.22	39.39
40—60		24.56	31.59	43.85	1.19	41.10
0—20	PMPNFS	20.33	26.71	52.96	1.24	39.30
20—40		21.83	30.46	47.71	1.19	40.31
40—60		22.49	31.50	46.00	1.16	42.28
0—20	PLPNFS	22.07	31.94	46.00	1.20	38.99
20—40		22.27	32.08	45.66	1.24	41.52
40—60		25.91	35.46	38.63	1.25	37.76
0—20	PUPWFS	21.99	30.28	47.73	1.26	39.18
20—40		22.98	30.49	46.53	1.20	42.94

续表

土层深度/cm Soil depth	样地 Sample plot	黏粒/% Clay	粉粒/% Silt	砂粒/% Sand	容重/(g/cm ³) Bulk density	田间持水量/% Field moisture capacity
40—60		24.39	30.04	45.57	1.29	37.44
0—20	PMPWFS	24.76	30.79	44.45	1.47	28.48
20—40		24.55	31.27	44.18	1.45	28.62
40—60		26.09	35.02	38.89	1.36	33.95
0—20	PLPWFS	23.33	32.23	44.44	1.43	32.93
20—40		20.68	29.16	50.16	1.21	40.15
40—60		24.91	31.44	43.65	1.31	34.19
0—20	JUPNFS	21.97	34.07	43.96	1.10	46.98
20—40		22.27	30.96	46.77	1.11	50.34
40—60		23.64	34.31	42.04	1.15	44.79
0—20	JMPNFS	23.19	32.89	43.91	1.18	42.22
20—40		23.10	31.73	45.18	1.20	40.54
40—60		25.09	32.53	42.38	1.27	36.65
0—20	JLPNFS	21.78	29.38	48.83	1.16	43.37
20—40		24.08	32.96	42.96	1.28	35.70
40—60		27.10	32.90	40.00	1.33	32.67
0—20	JUPWFS	19.37	25.51	55.12	1.06	48.27
20—40		18.44	25.06	56.51	1.22	38.99
40—60		20.56	26.92	52.52	1.25	37.99
0—20	JMPWFS	21.95	29.63	48.42	1.24	39.72
20—40		23.06	31.87	45.07	1.31	35.21
40—60		20.69	28.08	51.23	1.24	39.55
0—20	JLPWFS	19.96	29.67	50.37	1.20	42.48
20—40		20.82	29.18	50.00	1.21	42.24
40—60		25.02	32.14	42.84	1.28	37.21
0—20	CK	19.03	27.18	53.79	1.18	36.82
20—40		20.39	27.72	51.89	1.25	35.49
40—60		22.40	27.58	50.01	1.32	31.05

2.3 土壤渗透特性

采用 TWS-55 型渗透仪和自制的马里奥特瓶,用定水头法测定土壤渗透速率 K_t (mm/min)^[12]。

$$K_t = \frac{10 \times Q_n \times L}{t_n \times S \times (h + L)} \quad (1)$$

式中, Q_n 为若干时间内渗出的水量(mL), L 为环刀高度(cm), S 为环刀横截面积(cm²), t_n 为渗透间隔时间(min), h 为水层厚度(cm)。由于土壤渗透受温度影响较大,为了便于比较,将不同温度下所测值均换算成 10℃ 时的渗透速率 K_{10} 。

$$K_{10} = \frac{K_t}{0.7 + 0.03 \times t} \quad (2)$$

式中, t 为测定时水温(℃)。

2.4 土壤体积含水量监测

在多样地内较平坦处埋设 2m 长 PVC 管,采用 CPN-503 探头式中子土壤水分仪测定土壤水分,测定深度为 200cm,每 20cm 测定一次。监测时间为 5—9 月,具体日期是 5 月 15 日、5 月 31 日、6 月 14 日、7 月 6 日、7 月 21 日、7 月 30 日、8 月 13 日、8 月 27 日、9 月 19 日。在测定前需在多样地不同土层对中子仪进行标定,标

定时,0—20cm 表层土壤,用 TDR 测量中子管附近 5cm 范围内的表层土壤含水量,20—200cm 深度土壤,用土钻取样后采用烘干法测定土壤体积含水量,从而获得标定方程。

2.5 降雨量、气温与林冠截留量测定

在各个样地分别设置 Davis Vantage Pro2 自动气象站测定降雨量与气温,并在林内沿等高线布设 100cm×20cm×25cm 雨量槽测定穿透雨、在林外四周布设雨量筒测定林外降雨,二者之差即林冠截留量。

2.6 林地耗水量计算

考虑到扰动土壤与实地土壤有较大差异,在多样地内采用瞬时剖面法^[13],使用日产 DIK 3130 式张力计,每隔 10 cm 分层定时观测土壤土水势,结合体积含水量,确定相应范围内的水分特征关系曲线与非饱和土壤导水率^[14],结果见表 3。应用定位通量法^[15],可计算出多样地地下部分的耗水总量,其数值与实测林冠截留之和,为林地耗水量。

在本研究点完成的相关林分调查表明,试验林分乔木的根系分布范围主要集中在 0—2m 的土层中,因此可将定位点设定在根际层以下处,并定义为 Z_r 。由定位点上、下 Z_1 和 Z_2 处的土壤水吸力 φ_{m1} 和 φ_{m2} 及非饱和导水率 $K(\varphi)$ 进行计算。根据达西定律, Z_r 处的水分通量为:

$$q(Z_r) = -K(\varphi_m) \times \left(\frac{\varphi_{m2} - \varphi_{m1}}{\Delta Z} + 1 \right) \tag{3}$$

式中, $Z_r = (Z_1 + Z_2)/2$, $\Delta Z = Z_2 - Z_1$, 单位为 cm; φ_{m1} 和 φ_{m2} 分别为两点土壤水吸力, φ_m 取 φ_{m1} 和 φ_{m2} 的平均值,单位为 kPa。

通过任一断面 Z 处相应的水量 $Q(Z)$ 为:

$$Q(Z) = Q(Z_r) + \int_{Z_r}^Z \theta(Z, t_2) dZ - \int_{Z_r}^Z \theta(Z, t_1) dZ \tag{4}$$

当 $Z = 0$ 时,即为地表处的水通量, $Q(0)$ 小于 0 为实际蒸散量。本文中 Z_r 取 190cm, $\Delta Z = 20cm$, t_1 和 t_2 为两实际观测时间。

表 3 多样地土壤水分特征曲线与非饱和土壤导水率
Table 3 Soil moisture characteristic curves and unsaturated hydraulic conductivity of sample plots

样地 Sample plot	土壤水分特征曲线 Soil moisture characteristic curve	非饱和导水率 Unsaturated hydraulic conductivity
PUPNFS	$\varphi = 1213 \times e^{-2.437\theta}$, $R^2 = 0.9813$	$K(\varphi) = 6.9696 \times e^{-0.017\varphi}$, $R^2 = 0.8016$
PMPNFS	$\varphi = 964.41 \times e^{-1.875\theta}$, $R^2 = 0.8508$	$K(\varphi) = 1165.2 \times e^{-0.024\varphi}$, $R^2 = 0.8997$
PLPNFS	$\varphi = 1550.3 \times e^{-4.617\theta}$, $R^2 = 0.8826$	$K(\varphi) = 15935 \times e^{-0.028\varphi}$, $R^2 = 0.8998$
PUPWFS	$\varphi = 1441.3 \times e^{-2.869\theta}$, $R^2 = 0.8532$	$K(\varphi) = 12491 \times e^{-0.028\varphi}$, $R^2 = 0.9174$
PMPWFS	$\varphi = 3608.6 \times e^{-6.569\theta}$, $R^2 = 0.8355$	$K(\varphi) = 20659 \times e^{-0.026\varphi}$, $R^2 = 0.9192$
PLPWFS	$\varphi = 1483.8 \times e^{-2.793\theta}$, $R^2 = 0.9131$	$K(\varphi) = 36352 \times e^{-0.029\varphi}$, $R^2 = 0.8979$
JUPNFS	$\varphi = 1183.4 \times e^{-2.306\theta}$, $R^2 = 0.9055$	$K(\varphi) = 7882.9 \times e^{-0.027\varphi}$, $R^2 = 0.9035$
JMPNFS	$\varphi = 1002.6 \times e^{-1.964\theta}$, $R^2 = 0.8529$	$K(\varphi) = 36.483 \times e^{-0.019\varphi}$, $R^2 = 0.8896$
JLPNFS	$\varphi = 1187.7 \times e^{-2.105\theta}$, $R^2 = 0.8131$	$K(\varphi) = 615.69 \times e^{-0.023\varphi}$, $R^2 = 0.8769$
JUPWFS	$\varphi = 1134.9 \times e^{-3.025\theta}$, $R^2 = 0.8162$	$K(\varphi) = 5503.5 \times e^{-0.026\varphi}$, $R^2 = 0.8164$
JMPWFS	$\varphi = 1917.2 \times e^{-6.775\theta}$, $R^2 = 0.8206$	$K(\varphi) = 7669.6 \times e^{-0.027\varphi}$, $R^2 = 0.8646$
JLPWFS	$\varphi = 842.68 \times e^{-0.777\theta}$, $R^2 = 0.8297$	$K(\varphi) = 31.391 \times e^{-0.019\varphi}$, $R^2 = 0.9198$
CK	$\varphi = 1364 \times e^{-3.294\theta}$, $R^2 = 0.9301$	$K(\varphi) = 1546 \times e^{-0.024\varphi}$, $R^2 = 0.8306$

3 结果与分析

3.1 林地土壤持水特性分析

青海云杉、祁连圆柏林地和荒草地的土壤水分特征曲线如图 1 所示。样地各土层土壤水分特征曲线均呈

“L”型,即先迅速下降,之后逐渐变缓,最后基本平缓。其中,青海云杉林地的土壤水分特征曲线总体位于祁连圆柏之上,而荒草地始终位于青海云杉与祁连圆柏林地之下,这说明在相同土壤水吸力作用下,青海云杉林地的持水性比祁连圆柏好,荒草地的持水性比林地差。位于不同立地类型的青海云杉、祁连圆柏林地,各层土壤水分特征曲线形状基本相似,无显著变化趋势,此时坡位、坡向对于土壤水分特征曲线无显著影响。此外,青海云杉林地 0—20cm 土层较 20—40cm、40—60cm 土层的土壤水分特征曲线陡,而祁连圆柏林地不同土层深度的土壤水分特征曲线差异较小,即青海云杉林地表层土壤的持水性较下层差,而祁连圆柏林地内不同土层深度的土壤持水性无明显变化趋势。

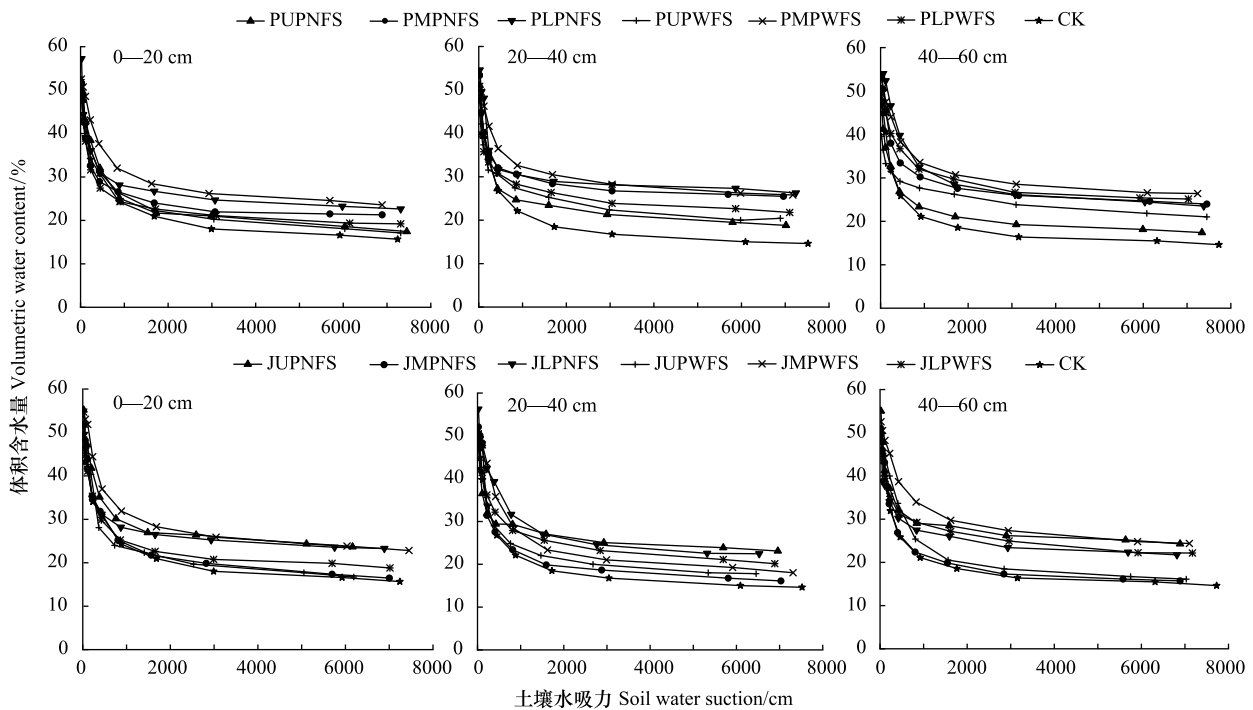


图1 各样地不同土层土壤水分特征曲线

Fig.1 Soil moisture characteristic curves of different soil layers in sample plots

3.2 林地土壤入渗特性分析

各林地的土壤初始渗透速率和稳定渗透速率结果如图2—3所示。各样地相同土层之间土壤的初渗速率、稳渗速率均呈极显著差异 ($P < 0.01$), 青海云杉林地土壤的初渗速率、稳渗速率总体大于祁连圆柏, 荒草地土壤的初渗速率和稳渗速率最小。不同立地条件下, 青海云杉林地阴坡土壤的初渗速率、稳渗速率小于半阴坡, 而祁连圆柏林地阴坡土壤的初渗速率、稳渗速率大于半阴坡。相同坡向, 上坡位林地土壤的初渗速率、稳渗速率小于下坡位。各样地内, 青海云杉林地土壤的初渗速率和稳渗速率随土层深度的增加而增强, 而祁连圆柏林地与荒草地土壤的初渗速率和稳渗速率随土层深度的增加而逐渐减弱。

3.3 林地土壤水分动态特性分析

3.3.1 剖面土壤水分随时间动态变化

由图4可以看出, 研究区降雨主要集中在7—9月份, 生长季气温与降雨量变化趋势大致相同, 均在7、8月份达到峰值。这与图5—7所呈现的各样地土壤水分季节变化相响应, 剖面土壤含水量表现为9月份最大, 其次是8月份, 6月份最小。5月中旬至6月中旬青海云杉、祁连圆柏林地和荒草地土壤含水量分别下降0.90%、0.77%和0.47%; 7、8月份青海云杉、祁连圆柏林地土壤含水量分别升高2.5%、1.83%, 而荒草地则升高了5.86%; 9月份土壤含水量均大幅度升高, 青海云杉、祁连圆柏林地和荒草地的土壤含水量分别比5月中旬增加17%、18%和37%。

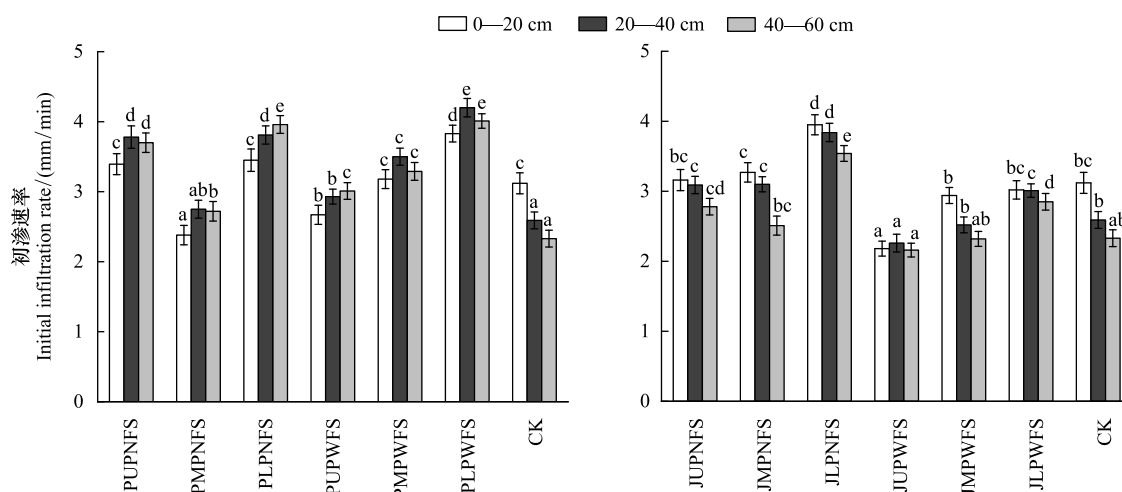


图2 各样地初始渗透速率/(mm/min)

Fig.2 Initial penetration Rate of sample plots

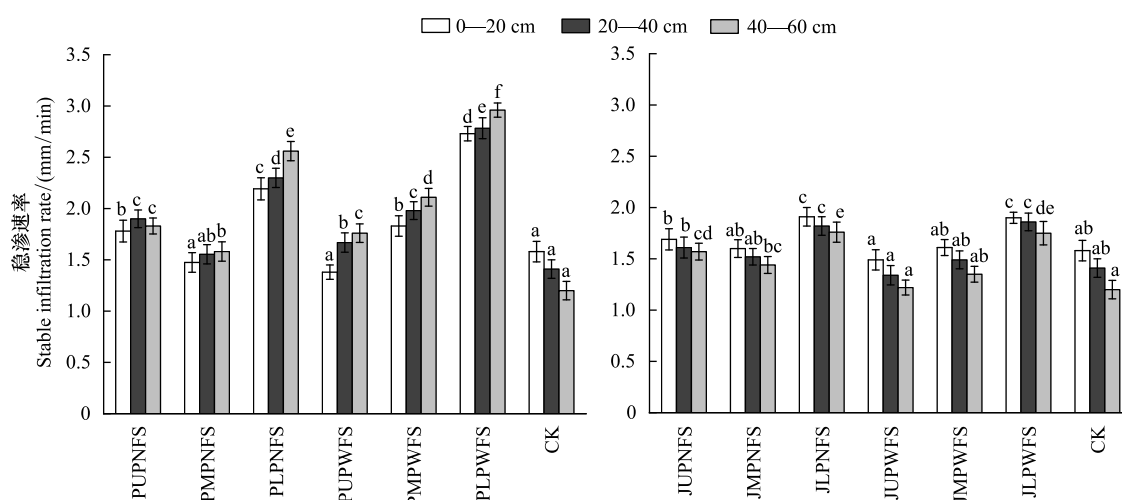


图3 各样地稳定渗透速率/(mm/min)

Fig.3 Stable penetration Rate of sample plots

同一土层不同字母表示不同样地间差异显著 ($P < 0.05$); 图中青海云杉 (*Picea crassifolia*)、祁连圆柏 (*Juniperus przewalskii* Kom.) 和荒草地 (CK) 分别用 P、J 和 CK 表示; 阴坡上坡 (Upper position of North faced slope)、阴坡中坡 (Middle position of North faced slope)、阴坡下坡 (Lower position of North faced slope)、半阴坡上坡 (Upper position of West faced slope)、半阴坡中坡 (Middle position of West faced slope)、半阴坡下坡 (Lower position of West faced slope) 分别用 UPNFS、MPNFS、LPNFS、UPWFS、MPWFS、LPWFS 表示

3.3.2 剖面土壤水分随空间动态变化

通过 SPSS18.0 统计软件中的 one-way ANOVA 和 Duncan 对土壤水分数据进行方差分析, 结果显示: 各样地与各样地相同土层之间土壤含水量存在极显著差异 ($P < 0.01$); 青海云杉林地土壤水分条件总体优于祁连圆柏, 荒草地的土壤水分条件则优于林地; 位于半阴坡的林地, 土壤含水量随坡位由上至下逐渐升高; 0—200cm 土层青海云杉林地土壤平均含水量为半阴坡下坡位 (26.97%) > 半阴坡中坡位 (26.01%) > 半阴坡上坡位 (25.05%) > 阴坡上坡位 (23.13%) > 阴坡中坡位 (21.11%) > 阴坡下坡位 (21.05%), 祁连圆柏林地土壤含水量为半阴坡下坡位 (24.76%) > 阴坡下坡位 (24.38%) > 阴坡上坡位 (22.86%) > 阴坡中坡位 (20.66%) > 半阴坡中坡位 (18.47%) > 半阴坡上坡位 (16.79%)。由图 8 可以看出, 0—40cm 土层各样地土壤含水量由浅至深迅速升高; 40—140cm 土层青海云杉林地除半阴坡下坡位外, 土壤含水量随着土层深度的增加呈现出减小的趋

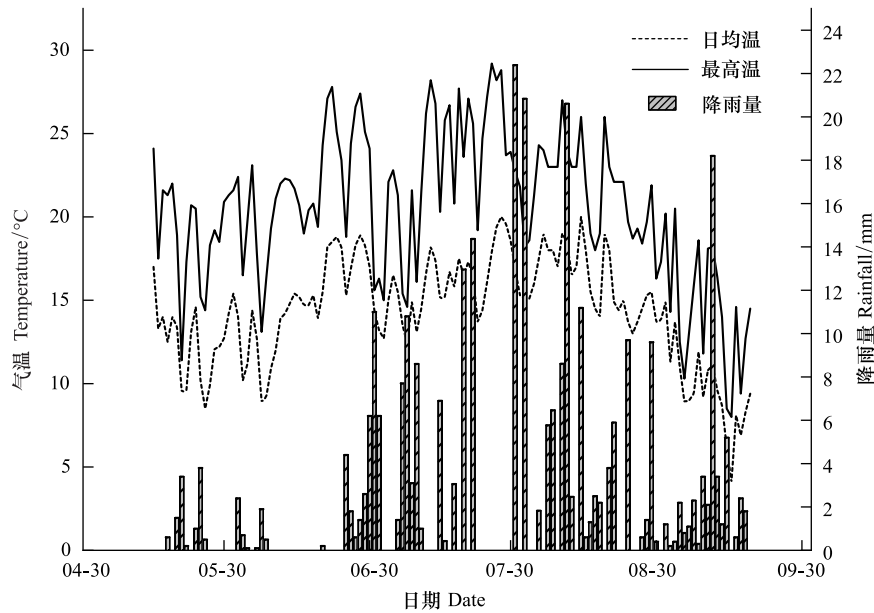


图4 生长季降雨量与温度特征

Fig.4 The characteristics of rainfall and temperature in growing season

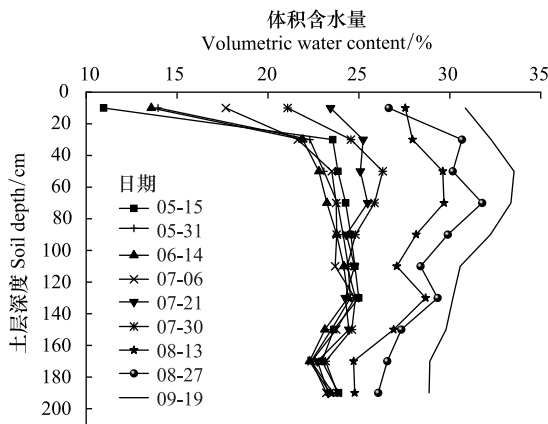


图5 荒草地剖面土壤含水量的季节变化

Fig.5 Seasonal variation of soil moisture content in profile of desert grassland (CK)

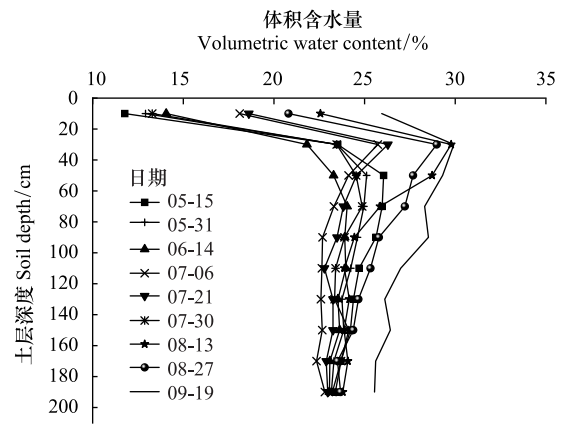


图6 青海云杉林地剖面土壤平均含水量的季节变化

Fig.6 Seasonal variation of average soil moisture content in profile of sample plots of *Picea crassifolia*

势,而祁连圆柏林地和荒草地土壤水分垂直变化不明显;140—200cm 土层青海云杉、祁连圆柏林地和荒草地土壤水分垂直变化均不明显。

3.3.3 剖面土壤水分垂直变异

各青海云杉、祁连圆柏林地和荒草地剖面土壤水分的变异系数曲线见图9:由于表层土壤水分直接受大气影响,土壤蒸发强烈且降雨补充迅速,各样地剖面土壤含水量均在0—20cm 土层变异最大,水分交换十分活跃,除青海云杉下坡位林地外,变异系数表现为同一坡位,阴坡大于半阴坡;20—40cm 土层各样地土壤水分变异系数较表土层显著减小($P<0.01$),变异系数曲线在该层呈现出明显拐点,土壤水分交换比较活跃,除青海云杉中坡位、祁连圆柏下坡位林地外,变异系数表现为同一坡位,半阴坡大于阴坡;40—200cm 土层各青海云杉、祁连圆柏林地土壤水分变异系数均值皆小于8%,而荒草地土壤水分变异系数均值为10.03%,剖面土壤水分变异总体减弱,土壤水分相对稳定。

3.4 林地耗水性分析

生长季各样地 0—200cm 土壤剖面层的耗水量如图 10 所示:生长季期间,青海云杉、祁连圆柏林地和荒草地耗水量均值分别为 251.09mm、238.85mm 和 146.19mm,青海云杉、祁连圆柏林地耗水量分别比荒草地高出 71.76%、63.38%;半阴坡林地耗水量均大于阴坡;5 月中旬至 6 月中旬,各样地日均耗水量为 0.90—1.25mm,耗水量较低;6 月中旬至 7 月初,青海云杉、祁连圆柏林地和荒草地日均耗水量较 5 月中旬至 6 月中旬分别增大 14.4%、27.93% 和 23.85%;7、8 月份青海云杉、祁连圆柏林地和荒草地耗水量日均耗水量分别为 2.91mm、3.04mm 和 1.50mm,耗水量达到生长季峰值;8 月底至 9 月中下旬,青海云杉、祁连圆柏林地蒸散耗水量均迅速减少,日均耗水量均值分别为 1.32mm、0.73mm 和 0.71mm。

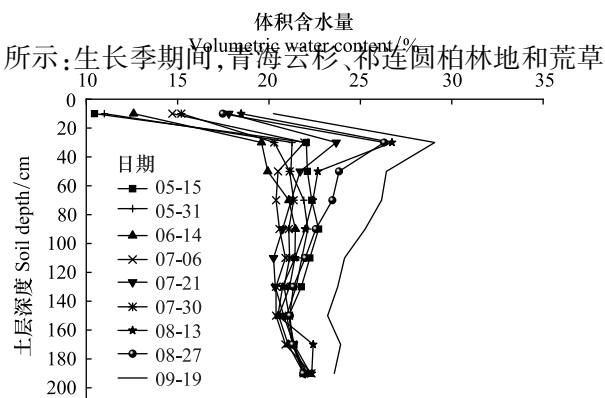


图 7 祁连圆柏林地剖面土壤平均含水量的季节变化

Fig.7 Seasonal variation of average soil moisture content in profile of sample plots of *Juniperus przewalskii* Kom.

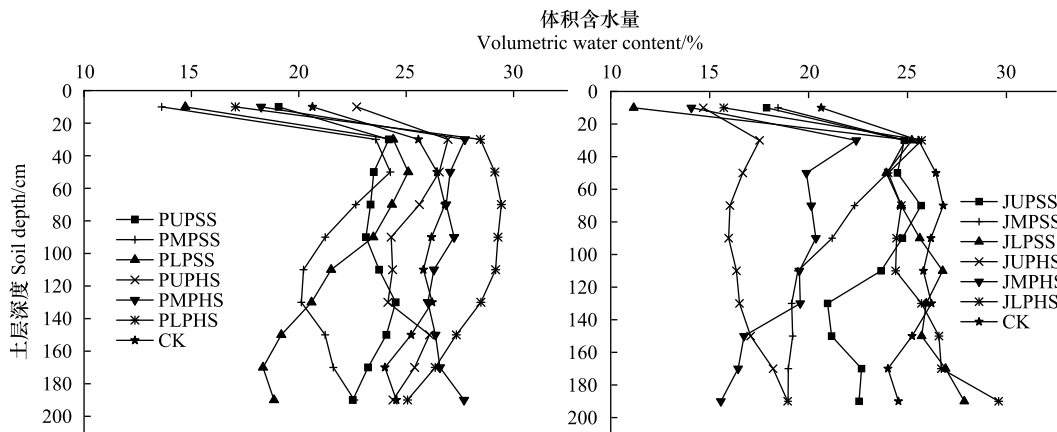


图 8 生长季内各样地剖面土壤平均含水量/%

Fig.8 Average soil moisture content of various plots during the growing season

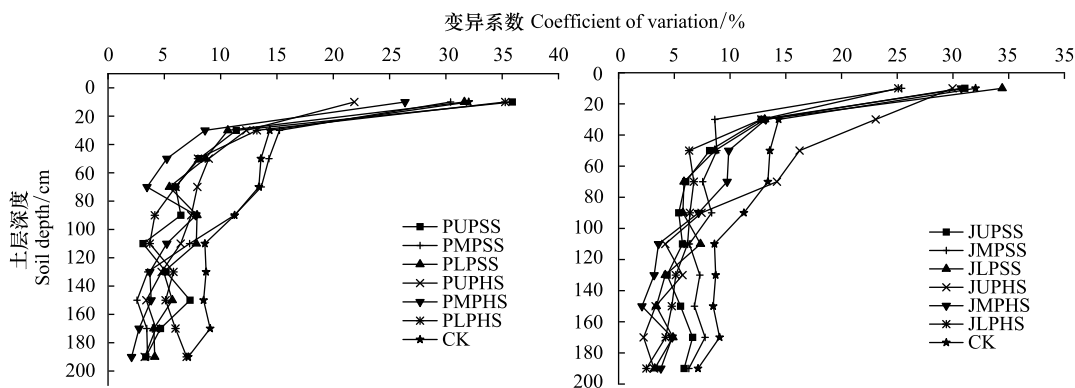


图 9 各样地剖面土壤水分变异特征

Fig.9 Variation characteristics of soil moisture in different profile of sample plots

4 讨论

土壤持水特性是评价不同林分土壤涵养水源及调节水分的一个重要指标^[16-17],而土壤水分特征曲线能

较好体现林地土壤的持水特性^[18-19],其主要受土壤质地和孔隙结构等物理特性的影响^[20]。由于测定时采用重塑土,土壤孔隙被破坏,土壤水分特征曲线测定结果对于孔隙度不同造成的持水性差异反映较为微弱,土壤质地起主导作用。本研究发现,青海云杉林地土壤水分特征曲线总体位于祁连圆柏之上,而荒草地始终位于林地之下,可见青海云杉林地土壤持水性优于祁连圆柏,荒草地持水性最差。这可能是因为青海云杉林地土壤的黏粒百分比大于祁连圆柏,而土壤黏粒是影响土壤基质特征最具有决定意义的粒径,其具有巨大的比表面积,且具有胶体的性质,表面可吸附大量的水分^[21],因而青海云杉林地的土壤对水分的吸持作用比较强。

土壤入渗能力决定了降雨再分配过程中地表径流和土壤储水能力大小,初始渗透速率和稳定渗透速率作为评价入渗特性的 2 个重要参数,能较好地表征土壤渗透能力^[22]。本研究结果表明,青海云杉林地的土壤渗透速率大于祁连圆柏,荒草地渗透性最差。祁连圆柏林地的土壤入渗性阴坡优于半阴坡,下坡位优于上坡位,且随土层深度的增加而减弱。如表 1 所示,祁连圆柏阴坡林分生长状况好于半阴坡,下坡林分生长状况好于上坡,林分更为生长茂盛,根系更为发达,土壤孔隙度也更大,从而导致土壤入渗性相对增强。袁建平等^[23]在黄土丘陵区小流域土壤入渗速率空间变异性的研究表明,阴坡土壤稳渗速率高于阳坡,稳渗速率由坡上部到坡下部逐渐提高。王意锐^[24]在浙西南毛竹林覆盖对土壤渗透性及生物特征的影响研究中发现,同一林地不同土壤层次下土壤渗透性能存在较大差异,随着土层加深各林地土壤渗透性能均降低。这与本研究结果一致。而青海云杉在半阴坡的生长状况优于阴坡,植被根系更粗壮发达,且根系主要分布在 20—50cm 土层,可能是导致青海云杉林地土壤入渗性半阴坡优于阴坡,且随土层深度的增加而增强的主要原因。

本研究发现,植被类型与立地类型是研究黄土高寒区土壤水分特性不可忽略的因素。各样地间土壤水分存在显著差异,青海云杉林地土壤水分条件总体优于祁连圆柏,荒草地土壤水分条件优于林地;半阴坡林地土壤含水量随坡位由上至下逐渐升高。这与胡相明^[25]、莫保儒^[26-27]等人的研究结果一致。其中祁连圆柏林地阴坡土壤水分含量高于半阴坡,而青海云杉林地半阴坡土壤水分含量高于阴坡,这很可能是由于所选青海云杉半阴坡样地位于山坳旁,受到山间集水影响。此外,本研究结果表明青海云杉、祁连圆柏林地土壤水分在降雨入渗、地表蒸发和植被蒸腾共同作用下保持着相对平衡的状态。林地 0—200cm 剖面土壤水分在 5、6 月份由于气温逐渐升高,林地耗水量增多而降雨不足,导致土壤水分消耗;7、8 月份气温急剧上升,雨季来临,林地蒸散作用强烈、天然降雨大量补充,土壤水分得到缓慢恢复;9 月份气温迅速降低,降雨量仍然充沛,林地土壤水分快速恢复,土壤含水量在生长季末期又升高至 5 月份生长季初期的 117.5% 左右。整个生长季期间,青海云杉、祁连圆柏林地土壤含水量均值分别在 22.44%—27.27%、20.07%—24.58% 范围内,荒草地土壤含水量均值在 22.27%—31.05% 范围内,可见,青海云杉、祁连圆柏林地的土壤水分状况较好,且土壤水分变异强度小于荒草地。

生长季期间,林地耗水量呈现出先增加,在 7、8 月份达到峰值后逐步减少的趋势,期间荒草地耗水量远小于林地。这与常国梁^[28]、党宏忠^[10]等人的研究结果一致。半阴坡林地的耗水量大于阴坡,这与魏天兴^[29]、王力^[30]等人的研究结果一致,这是半阴坡光照条件好于阴坡、土壤蒸发更强烈所导致的。生长季期间,青海云杉林地的平均耗水量大于祁连圆柏林地,但 7、8 月份青海云杉林地的平均耗水量却小于祁连圆柏。由图 4 可知,7、8 月份降雨量达到峰值,此时土壤水分充足,土壤蒸发主要受大气蒸散力的控制^[31],而大气蒸散力的

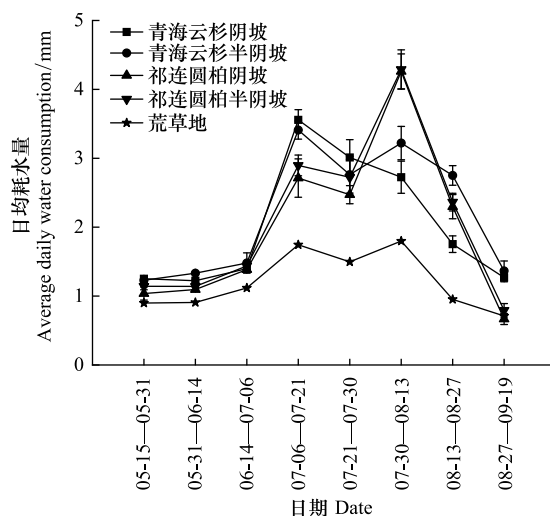


图 10 生长季期间样地日均耗水量/mm

Fig.10 Daily average water consumption of the plot during the growing season

主要影响因子——温度也在此刻达到峰值,故土壤蒸发在7、8月达到最大值。此外,由表1可知,青海云杉林地的植被盖度大于祁连圆柏,林分生长状况也优于祁连圆柏。因此,这很可能是由于5、6月份气温较低、降雨较少,土壤蒸发较弱,林分蒸腾在林地总耗水中起主导作用,于是青海云杉林地耗水量大于祁连圆柏林地;7、8月份土壤蒸发强烈,林下土壤蒸发占林地总耗水的比例大,青海云杉林地土壤蒸发小于祁连圆柏林地,于是青海云杉林地耗水量小于祁连圆柏林地。

不当的人工植被建设可能会导致土壤干层,土壤水分过度消耗。据李玉山^[32]定义,土壤干层含水量上限是土壤稳定持水量。稳定含水量指在黄土高原干旱气候、土壤质地、自然植被等因素作用下,通常旱地土壤能够长期维持的土壤含水量,其值约为田间持水量的50%—75%^[33]。本研究显示,研究区林地土壤水分在6月中旬达到最低值时,但除表层土壤,林地剖面土壤含水量均处于土壤稳定持水量范围内;9月中下旬,林地土壤水含水量较5月中旬增加了17.5%,说明林地土壤水分有所盈余。可见,生长季期间,林分均处于充分供水状态,并未出现土壤干层、土壤水分过度消耗等现象。

5 结论

对典型立地的青海云杉、祁连圆柏林地的土壤持水特性、土壤渗透特性、土壤水分动态和土壤耗水特性进行综合分析,结果表明:虽然青海云杉林地的土壤水分特性整体优于祁连圆柏林地,青海云杉林地耗水量大于祁连圆柏林地,但是二者的土壤水分状况都比较好,并未出现土壤干层、土壤水分过度消耗等现象。研究区的青海云杉、祁连圆柏林分能有效拦蓄天然降水、维持水分收支平衡,在之后黄土高寒区的植被建设过程中,可继续配置青海云杉、祁连圆柏作为水源涵养林,但要注意控制林地耗水量,对林分密度进行合理调整,从而保证林分正常生长,实现水土保持措施可持续发展。

参考文献(References):

- [1] 邵明安,贾小旭,王云强,朱元骏. 黄土高原土壤干层研究进展与展望. 地球科学进展, 2016, 31(1): 14-22.
- [2] 张涵丹,卫伟,陈利顶,于洋,杨磊,贾福岩. 典型黄土区油松树干液流变化特征分析. 环境科学, 2015, 36(1): 349-356.
- [3] 顾梦鹤,谢泽慧,王春晖,周立华. 库布其沙漠8种防护林的土壤水分特征. 草业科学, 2017, 34(12): 2437-2444.
- [4] 姚雪玲,傅伯杰,吕一河. 黄土丘陵沟壑区坡面尺度土壤水分空间变异及影响因子. 生态学报, 2012, 32(16): 4961-4968.
- [5] 张晨成,邵明安,王云强,贾小旭. 黄土区切沟对不同植被下土壤水分时空变异的影响. 水科学进展, 2016, 27(5): 679-686.
- [6] 陈洪松,邵明安. 黄土区坡地土壤水分运动与转化机理研究进展. 水科学进展, 2003, 14(4): 513-520.
- [7] 徐志尧,张钦弟,杨磊. 半干旱黄土丘陵区土壤水分生长季动态分析. 干旱区资源与环境, 2018, 32(3): 145-151.
- [8] 刘晓丽,马理辉,杨荣慧,吴普特,汪有科. 黄土半干旱区枣林深层土壤水分消耗特征. 农业机械学报, 2014, 45(12): 139-145.
- [9] 霍嘉仪,陈丽华,及金楠,瞿文斌. 晋西黄土区不同林地类型对土壤水分特性的影响. 山地学报, 2018, 36(3): 364-371.
- [10] 党宏忠,赵雨森,陈祥伟,李进军,达光文,朱有文. 祁连山青海云杉林地土壤水分特征研究. 应用生态学报, 2004, 15(7): 1148-1152.
- [11] 魏永霞,王鹤,吴昱,刘慧. 生物炭对不同坡度坡耕地土壤水动力学参数的影响. 农业机械学报, 1-16. (2018-11-28) [2019-01-23]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1964.s.20181127.0728.018.html>.
- [12] 刘凯,贺康宁,田赞,王先棒,董喆. 青海高寒山区5种林分的土壤特性及其水源涵养功能. 水土保持学报, 2017, 31(3): 141-146.
- [13] 贺康宁. 水土保持林地土壤水分物理性质的研究. 北京林业大学学报, 1995, 17(3): 44-50.
- [14] 雷志栋,杨诗秀,谢森传. 田间土壤水分运动参数的标定. 水利学报, 1986, (12): 1-10.
- [15] 雷志栋,杨诗秀,谢森传. 田间土壤水量平衡与定位通量法的应用. 水利学报, 1988, (5): 1-7.
- [16] 余新晓,张建军,朱金兆. 黄土地区防护林生态系统土壤水分条件的分析与评价. 林业科学, 1996, 32(4): 289-297.
- [17] 李航,严方晨,焦菊英,唐柄哲,张意奉. 黄土丘陵沟壑区不同植被类型土壤有效水和持水能力. 生态学报, 2018, 38(11): 3889-3898.
- [18] 刘继龙,马孝义,张振华. 不同土层土壤水分特征曲线的空间变异及其影响因素. 农业机械学报, 2010, 41(1): 46-52.
- [19] 宁婷,郭忠升,李耀林. 黄土丘陵区撂荒地土壤水分特征曲线及水分常数的垂直变异. 水土保持学报, 2014, 28(3): 166-170.
- [20] Gardner W R. Availability and measurement of soil water//Kozlowski T T, ed. Water Deficits and Plant Growth. London: Academic Press, 1968: 107-135.
- [21] 李品芳,杨永利,兰天,郭世文,张凯,韩纪委,张清. 天津滨海盐渍土客土改良后的土壤理化性质与持水特性. 农业工程学报, 2017, 33(7): 149-156.

- [22] 葛东媛, 张洪江, 王伟, 吕文星, 王幸. 重庆四面山林地土壤水分特性. 北京林业大学学报, 2010, 32(4): 155-160.
- [23] 袁建平, 雷廷武, 郭索彦, 蒋定生. 黄土丘陵区小流域土壤入渗速率空间变异性. 水利学报, 2001, 32(10): 88-92.
- [24] 王意锟, 金爱武, 方升佐. 浙西南毛竹林覆盖对土壤渗透性及生物特征的影响. 应用生态学报, 2017, 28(5): 1431-1440.
- [25] 胡相明, 赵艳云, 程积民, 万惠娥. 云雾山自然保护区环境因素对土壤水分空间分布的影响. 生态学报, 2008, 28(7): 2964-2971.
- [26] 莫保儒, 蔡国军, 杨磊, 芦娟, 王子婷, 党宏忠, 王多锋, 戚建莉. 半干旱黄土区成熟柠条林地土壤水分利用及平衡特征. 生态学报, 2013, 33(13): 4011-4020.
- [27] 莫保儒, 王子婷, 蔡国军, 杨磊, 党宏忠, 王多锋, 薛睿. 半干旱黄土区成熟柠条林地剖面土壤水分环境及影响因子研究. 干旱区地理, 2014, 37(6): 1207-1215.
- [28] 常国梁, 赵万启, 贺康宁, 史长青. 青海大通退耕还林工程区的林木耗水特性. 中国水土保持科学, 2005, 3(1): 58-65.
- [29] 魏天兴, 朱金兆, 张学培, 贺康宁, 高宗杰. 晋西南黄土区刺槐油松林地耗水规律的研究. 北京林业大学学报, 1998, 20(4): 36-40.
- [30] 王力, 卫三平, 吴发启. 黄土丘陵沟壑区土壤水分环境及植被生长响应——以燕沟流域为例. 生态学报, 2009, 29(3): 1543-1553.
- [31] 李艳, 刘海军, 黄冠华. 麦秸覆盖条件下土壤蒸发阻力及蒸发模拟. 农业工程学报, 2015, 31(1): 98-106.
- [32] 李玉山. 黄土区土壤水分循环特征及其对陆地水分循环的影响. 生态学报, 1983, 3(2): 91-101.
- [33] 李军, 陈兵, 李小芳, 程积民, 郝明德. 黄土高原不同干旱类型区苜蓿草地深层土壤干燥化效应. 生态学报, 2007, 27(1): 75-89.