

科尔沁沙地南缘樟子松人工林对土壤水盐的影响

郎明翰¹, 张日升¹, 韩辉¹, 王旭¹, 凡胜豪²

(1.辽宁省沙地治理与利用研究所, 辽宁章古台科尔沁沙地生态系统国家定位观测研究站,

辽宁 阜新 123000; 2.辽宁省水利事务服务中心, 沈阳 110003)

摘要: 为掌握科尔沁沙地南缘樟子松造林 40 多年对土壤水分、盐度的影响。以科尔沁沙地樟子松林地、草地 2020 年 3 月至 2021 年 11 月土壤、气象数据为基础, 采用双累积曲线法(DCM)验证样地选取的合理性, 利用空间代替时间法(STM)研究樟子松林地、草地土壤含水量、盐度的变化规律, 以及与气象因子关系的差异。樟子松林地改变了土壤纵向剖面水分、盐度分布规律, 二者均趋于正“S”形分布; 林地有效提高土壤储水量($p < 0.05$), 降低土壤盐度, 缩减水分次活跃层范围; 林地土壤水分变异性更高($p < 0.05$), 盐度变异性更低($p > 0.05$); 林地的气象因子与土壤水分、盐度指标各分项之间关联程度与草地不同, 减弱与降雨的相关性, 增加与水汽压亏缺的相关系数。樟子松林生态系统具有较强的涵养水源、抑制土壤盐渍化的功能。

关键词: 科尔沁沙地; 樟子松人工林; 土壤含水量; 土壤盐度

中图分类号: S715.3

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2023)05-0370-07

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2023.05.045

Effects of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* Plantation on Soil Water and Salt in the Southern Edge of Horqin Sandy Land

LANG Minghan¹, ZHANG Risheng¹, HAN Hui¹, WANG Xu¹, FAN Shenghao²

(1. Liaoning Institute of Sandy Land Control and Utilization, National

Positioning Observation and Research Station of Horqin Sandy Land Ecosystem,

Fuxin, Liaoning 123000; 2. Soil and Water Conservation Bureau of Liaoning Province, Shenyang 110003)

Abstract: To understand the impact of more than 40 years of afforestation of *Pinus sylvestris* plantation on soil water and salt in the southern edge of Horqin sandy land, based on the soil and meteorological data of *P. sylvestris* forest land and grassland from March 2020 to November 2021 in Horqin sandy land, the double cumulative curve method (DCM) was used to verify the rationality of sample plot selection, the spatial instead of time method (STM) was used to study the variation pattern of soil water content and salinity in *P. sylvestris* forest land and grassland and the differences in their correlation with meteorological factors. *P. sylvestris* forest changed the distribution of water and salt in the longitudinal profile of the soil, both tended to be in a positive "S" shape. Forest effectively increased soil water storage ($p < 0.05$), reduced soil salinity, and reduced the range of water sub active layer. The variability of forest soil water was higher ($p < 0.05$), while the variability of salinity was lower ($p > 0.05$). The correlation degree between the meteorological factors and soil moisture and salinity indicators in forest was different from that in grassland, weakening the correlation with rainfall and increasing the correlation coefficient with water vapor pressure deficit. These results indicated that *P. sylvestris* forest ecosystem had a strong function of water conservation and soil salinization inhibition.

Keywords: Horqin Sandy Land; *Pinus sylvestris* plantation; soil moisture content; soil salinity

土地沙化是气候变化和人为活动的作用下, 在干旱、半干旱和亚湿润干旱区引起的土地退化^[1]造成土地资源逐渐减少、土地生产力逐渐下降、地表呈现出类似沙漠的景观^[2]。科尔沁沙地是我国最大的沙地,

其南缘又处农牧交错带, 生态环境脆弱, 土地极易沙化。沙地主要由石英砂组成, 具有易飞扬和流动的特性, 土壤中营养物质极微, 有机质含量低, 透水性强, 持水量低^[3]。这样的环境特征对植被尤其树种的生

收稿日期: 2023-02-08

资助项目: 国家自然科学基金项目(32071836); 中央财政林业科技推广示范项目(黑[2020]TG16 号); 辽宁省农业科学院基本科研业务费计划项目(2021HQ1913)

第一作者: 郎明翰(1995—), 男, 辽宁丹东人, 硕士, 助理工程师, 主要从事森林水文学方面的研究。E-mail: 18804502009@163.com

通信作者: 张日升(1976—), 男, 主要从事荒漠化防治和森林培育研究。E-mail: zrs973204@163.com

长极其不利^[4],严重制约农林业的可持续发展。沙地樟子松林是营造的巨量防护林中最具代表性的一类植被^[5],占地面积接近 80 万 hm^2 ^[6]。沙地樟子松人工林的成败被认为是“三北”防护林建设工程成功与否的重要标志^[7]。自 20 世纪 90 年代后,引种区樟子松出现中幼龄期生长量加速、成熟期提前“早衰”^[8]现象,“早衰”是林水关系严重失调的结果。土壤水、盐度是土壤重要组成部分,是植物生长的重要影响因素。所以研究沙地樟子松土壤水盐运移规律的影响因素及调控机理具有重要的现实意义。

土壤水盐运动规律主要指土体中盐分和水分在不同时期一定的生态环境中的运动变化规律和特征,是相伴进行密不可分的^[9]。对土壤水盐运移的研究最早起源于 Darcy 定律(固体热传导方程)。此后,国内外学者在研究水盐运动规律过程中建立了大量模型,并逐步针对土壤水盐展开更加深入的研究。目前国内外对干旱区天然芦苇和黍、葡萄园、灌区、柽柳、人工固沙植被、不同荒漠植被、绿洲、沙漠植物园等土壤水盐特征、空间异质性与新方法^[10]进行研究,对樟子松人工林土壤的研究主要集中在沙地土壤含水量的分析。本研究利用空间代替时间^[11]的方法,以草地为对照,研究樟子松人工林对土壤水盐的影响,为樟子松人工林修复、经营管理提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于辽宁省彰武县章古台镇辽宁省沙地治理与利用研究所实验林场(42°43'N,122°22'E)三家子试验区,地处科尔沁沙地东南部,原分布着大面积沙丘沙地,经过治理后,大多数转化固定沙丘沙地^[7]。试验区年平均气温 6.3 °C,全年无霜期 150~160 天,年平均降水量 500 mm,年平均蒸发量 1 550 mm,历年最低气温 -30.5 °C,属于半湿润气候。土壤以风沙土为主,沙层厚度为 126~128 m^[9],沙土贫瘠,流动风沙土 0—30 cm 内有机质含量为 3.3~3.6 g/kg,樟子松林地 0—30 cm 土层有机质含量为 4.2~5.0 g/kg。

1.2 样地的选取

在前期大量踏查的基础上,选择营建于 1978 年、林龄已达 44 年的樟子松人工林作为样地,同时选择地形相似草地作为对对照样地。樟子松林样地与对照样地的海拔相差较小,樟子松林地 200 m,草地 220 m;2 个样地均为平地(坡度为 0);樟子松人工林林下主要植被有细叶胡枝子(*Lespedeza daurica*)、兴安胡枝子(*juncea* var. *subsericea* L.)、拂子茅(*Calamagrostis epigeios*)、马唐(*Digitaria sanguinalis*)和披碱草(*Chloris virgata*)等,草地主要植被有苔草(*C. tristachya*)、隐子草(*C. squarrosa*)、茵陈蒿(*Artemisia capillaris*)和糙叶黄

耆(*Astragalus scaberrimus*)等。

1.3 数据获取与处理

在样地中布设土壤原位多要素监测站 I 型(Fleb-30c)仪器,对土壤 10,50,100,150,200 cm 土层的土壤含水量和盐度进行连续监测,记录时间间隔为 1 h。气象数据来源于试验林场自动气象站(CAWS600-B 型),自动记录气象指标有气温、空气湿度、辐射、降雨、风速,记录时间间隔为 1 h。观测时段为 2020 年 3 月 1 日至 2021 年 11 月 30 日,共计 21 个月。

土壤储水量(SWS, mm)为一定厚度土壤中所含的水量,计算公式为:

$$\text{SWS}_i = \theta_i h_i \quad (1)$$

$$\text{SWS} = \sum_i^m \text{SWS}_i \quad (2)$$

式中:SWS_i为每层土壤储水量(mm); θ_i 为土壤体积含水量(%); h_i 为土层厚度(mm); m 为土壤层序号;SWS 为土壤总储水量(mm)。

变异性的计算公式为:

$$v = \frac{|s_i - \bar{s}|}{\bar{s}} \quad (3)$$

式中: v 为变异性; s 为土壤储水量(mm)或者土壤盐度(dS/m)。

土壤储水量浮动系数公式为:

$$\text{FIndex} = \frac{\sum_{i=1}^n |q_i - q_{i-1}|}{\sum_{i=1}^n q_i} \quad (4)$$

式中:FIndex 为浮动系数; q 为土壤储水量(mm)。

水汽压亏缺的公式为:

$$\text{VPD} = 0.611 e^{\frac{17.502T}{T+240.97}} (1 - H_R) \quad (5)$$

式中:VPD 为水汽压亏缺(kPa); T 为气温(°C); H_R 为辐射(W/m^2)。

文中所有数据采用 R-Studio、Microsoft Excel 和 Origin 2017 等统计分析软件对试验数据进行分析与作图,分析气象因子与土壤水分、盐度之间关系之前,利用 ARIMA 模型去除各时间序列数据自相关性。

2 结果与分析

2.1 草地、樟子松林地储水量特征

双累积曲线是检验 2 个水文变量在研究时段内变化趋势的一致性^[12],如果双累积曲线出现明显的拐点,则代表着 2 个样地之间降雨存在极大的空间异质性^[13],证明样地选择不合理,存在除土地利用类型之外的其他未知差异。由图 1 可知,樟子松人工林与草地储水量累积量双累积曲线呈现极显著的线性关系($p < 0.01$),无明显拐点,表明 2 个样地的特征无明显差异,即观测期内在降雨量空间异质性极小,样地选择合理^[12]。

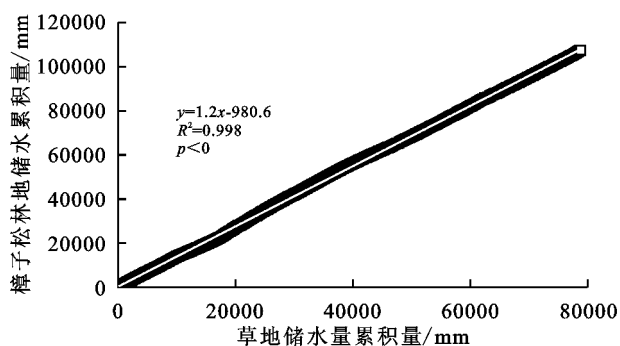


图 1 土壤储水累积量曲线及线性回归关系

2.2 土壤水盐垂直分布特征

樟子松林地改变土壤纵向剖面土壤水分分布状态,剖面水分曲线从反“S”形变为正“S”形;同时林地改变土壤水分随土层深度增加,但不改变水分曲线的收敛现象(图 2a),2 块样地各月份土壤含水量具有相同的变化趋势。由土壤水分纵向剖面收敛现象表明,随着土层深度的增加,各月份水分变化趋于稳定。草地 10—50 cm 土壤含水量随土层深度的增加而增加,50—100 cm 土壤含水量随土层深度的增加而减小,100—200 cm 土壤含水量随土层深度的增加而增加,草地土壤水分曲线呈现反“S”形变化趋势,曲线整体趋势随着土层深度的增加而增加。各月份 10 cm 土壤含水量范围为 3.38%~8.92%,差值为 5.51%;随着土层深度增加至 200 cm,土壤含水量范围变为 8.88%~12.48%,差值为 3.62%。樟子松林地土壤剖面水分曲线与草地水分曲线规律相反,10—100 cm 土壤含水量随土层深度的增加而减小,100—150 cm 土壤含水量随土层深度的增加而增加,150—200 cm 土壤含水量随土层深度的增加而减小,曲线整体趋势为随着土层深度的增加而减小,土壤水分曲线呈现“S”形变化趋势。10 cm 土壤含水量范围为 10.47%~18.16%,差值为 7.69%;200 cm 土壤含水量范围为 5.31%~9.69%,差值为 4.38%。

樟子松人工林的营造改变土壤水分的再分配,导致土壤盐分的分配状态发生变化,但并不改变其盐分曲线随土层深度逐渐增减趋势和收敛的现象(图 2b)。草地 2 年盐度纵向变化均呈现喇叭状收敛趋势,且各月份增减规律不一致,樟子松林地各月份盐度纵向变化呈现明显的正“S”形,各月份曲线形状一致,同时曲线线型随着土层深度的增加逐渐收敛。各曲线收敛现象代表着随着土层深度的增加,各月份的水分、盐度含量逐渐接近,意味着土壤受外界影响的程度逐渐减小。

2.3 土壤水分活动层分布

根据标准差(SD)判别[即 $SD > 1.5\%$, $1\% < SD < 1.5\%$, $SD < 1\%$ 3 个等级(表 1)],土壤湿度剖面自上而下可以划分为水分活跃层、水分次活跃层和水分相对稳定层^[14]。土壤水分动态成因主要有降雨、植被根系吸水、地面蒸发和浅层地下水补给等。通过 0—

200 cm 土壤含水量纵向分布曲线可以看出,樟子松林地、草地土壤水分剖面具有共同的特征,即剖面上部水量变化剧烈,下部水量变化较小。土壤剖面上层的土壤处于水分消耗、补充的交替过程中,土壤含水量剧烈波动,称为活动层;林地导致土壤活动层发生较大的变化(表 2)。2020 年和 2021 年草地水分活跃层为 0—25 cm,樟子松林地水分活跃层为 0—75 cm,林地水分活跃层向下增加 50 cm;2021 年草地土壤 25—75 cm 为水分次活跃层,林地水分次活跃层消失;2020 年草地水分相对稳定层分别为 75—200 cm,樟子松林地水分相对稳定层为 125—200 cm,林地导致水分相对稳定层向上增加 50 cm。2021 年草地和樟子松林地水分相对稳定层均为 75—200 cm。

2.4 土壤水盐季节性动态特征

土壤水分、盐度曲线具有明显的季节性动态特征,其曲线变化过程线形态与降雨事件存在明显的一一对应关系,林地导致土壤储水量升高,盐度降低(图 3)。降雨事件主要集中在 6—9 月,该时期土壤储水量与降雨事件存在明显的一一对应关系;3—5 月、10—11 月降雨事件较少,降雨量不足,该时期土壤储水量较为平稳,同时草地、林地的土壤储水量变化过程线形态一致,出现拐点的时间基本同步,樟子松林地土壤储水量始终高于草地土壤储水量,平均值分别为 204.98,155.85 mm,储水量提高 31.52%。土壤盐度变化曲线与土壤水分曲线具有相同的变化规律,具有明显的季节性动态特征,随着降雨事件的发生而出现剧烈的波动变化,同时草地、林地的土壤盐度变化曲线形态一致,出现拐点的时间基本同步,涨落幅度相近,草地盐度始终高于樟子松林地,其平均值分别为 0.128,0.115 dS/m,盐度降低 11.30%。

2.5 土壤水盐变异性特征

林地储水量变异性高于草地储水量变异性,证明其对造林的治理手段更加敏感,林地使土壤储水偏离年平均储水。樟子松林地土壤储水量变异系数大于草地,其平均值分别为 0.20 和 0.18,林地使土壤储水量提高 13.67%,差异达到显著水平($p = 0.039 < 0.05$)(图 4)。另一方面,樟子松林使土壤盐度变异性降低,草地和樟子松林地土壤盐度变异性平均值分别为 0.119 和 0.113,但差异未达到显著水平($p = 0.102 > 0.05$)(图 4b)。引入土壤储水量的浮动系数,以期进一步探究樟子松林地对土壤水分的影响。土壤储水量变化率决定浮动性,储水量变化率较快的浮动性大,储水量变化率较慢的较为稳定。根据储水量曲线,将其划分为 7 段涨水落水时段,计算 7 段加全年的水分浮动系数(图 5)。结果(表 3)表明,樟子松林地和草地各涨水落水事件发生时间一致,且浮动系数相差不大,唯独事件涨水Ⅲ和落水Ⅳ的浮动系数差距

巨大,樟子松林地储水涨水系数是草地的 2.23 倍,樟子松林地储水事件落水Ⅳ的系数是草地 2.30 倍。

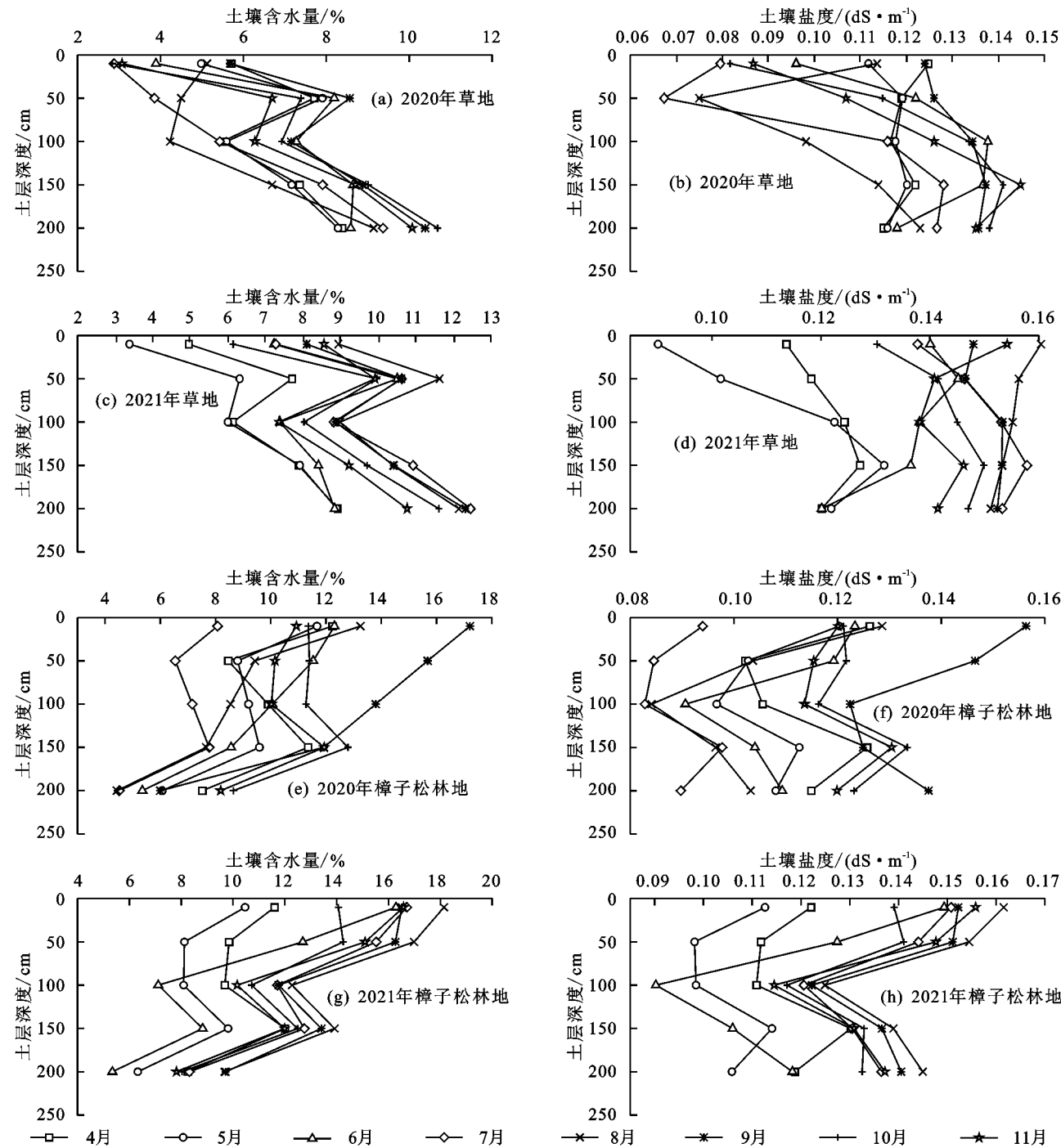


表 1 土壤含水量标准差

年份	土层深度/cm	樟子松林地								草地							
		4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月
2020	0—25	2.65	4.20	4.56	2.38	5.43	2.31	0.84	0.35	1.27	2.46	2.20	1.69	2.07	1.15	0.20	3.32
	25—75	0.19	1.75	3.62	0.17	4.50	1.33	0.89	0.62	0.21	2.14	2.41	0.43	2.93	0.65	0.58	0.31
	75—125	0.34	0.56	1.27	0.39	0.95	1.25	3.60	0.38	0.04	0.21	0.57	0.63	2.04	0.37	0.38	0.10
	125—175	0.27	0.65	0.33	0.13	0.17	2.56	0.49	0.67	0.07	0.06	0.75	0.44	0.27	1.22	0.35	0.08
	175—200	0.40	0.50	0.32	0.13	0.16	1.38	0.17	0.61	0.06	0.04	0.45	0.05	0.07	0.66	0.31	0.11
2021	0—25	2.37	2.40	4.09	4.86	2.20	2.54	0.91	2.55	1.56	1.00	2.40	3.52	1.78	3.16	0.79	2.96
	25—75	0.69	0.46	2.74	2.95	1.31	1.74	0.74	2.01	0.19	0.85	2.05	2.59	1.68	2.18	0.58	0.97
	75—125	0.57	0.67	0.09	1.76	0.93	0.66	0.34	0.14	0.04	0.15	1.01	1.51	0.91	1.37	0.42	0.11
	125—175	0.34	0.73	0.12	2.34	1.21	0.79	0.31	0.24	0.10	0.10	1.07	1.56	0.95	1.27	0.36	0.07
	175—200	0.17	0.85	0.09	2.02	0.84	0.83	0.45	0.24	0.06	0.05	0.12	1.46	0.57	0.88	0.43	0.20

表 2 土壤水分活动层范围

年份	样地	活跃层		次活跃层		相对稳定层	
		SD	土层范围/cm	SD	土层范围/cm	SD	土层范围/cm
2020	草地	1.80	0—25	1.21	25—75	0.22~0.54	75—200
	樟子松林地	1.63~2.84	0—75	1.09	75—125	0.46~0.66	125—200
2021	草地	2.15	0—25	1.39	25—75	0.47~0.69	75—200
	樟子松林地	1.58~2.74	0—75	—	—	0.65~0.76	75—200

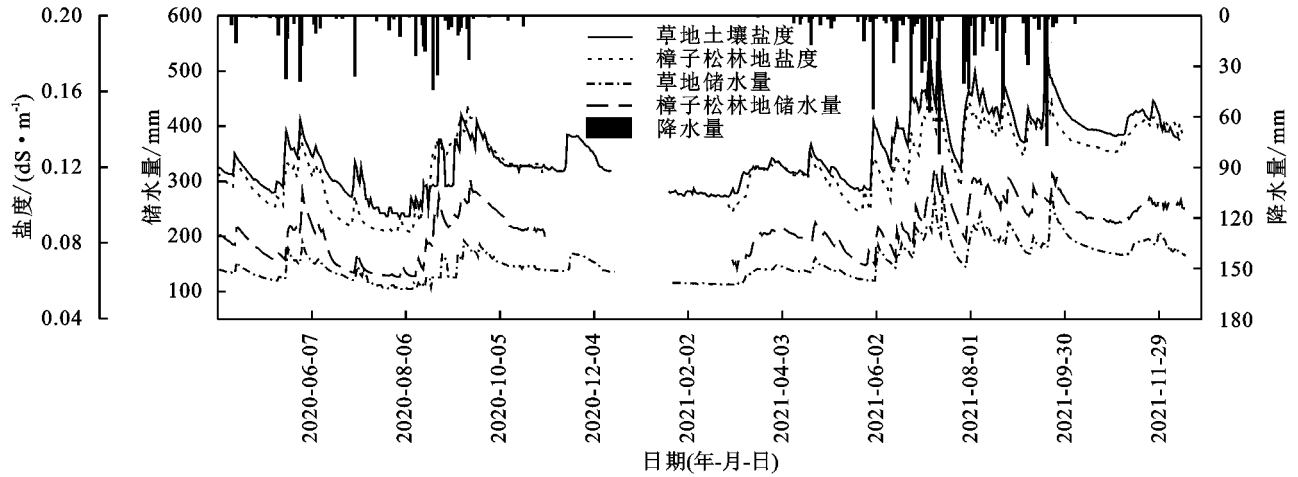


图 3 土壤储水量和降水量动态变化特征

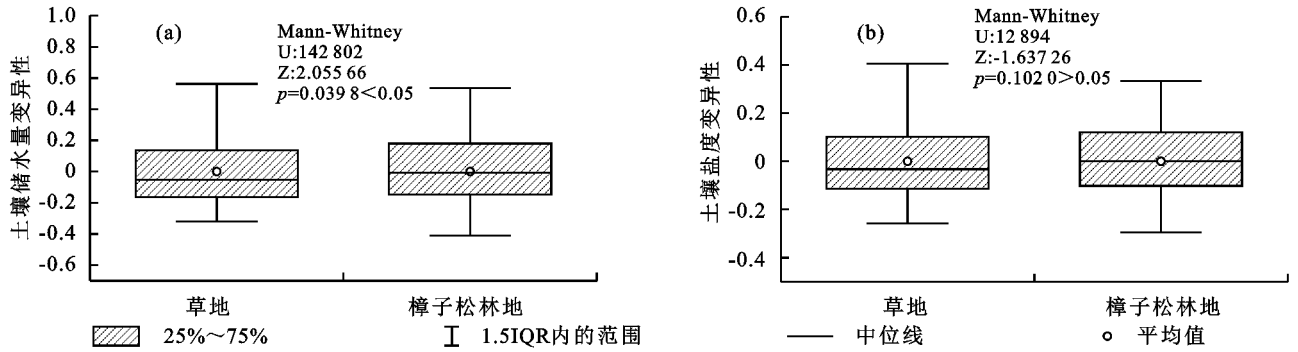


图 4 土壤水盐变异性及 Mann-Whitney U 检验

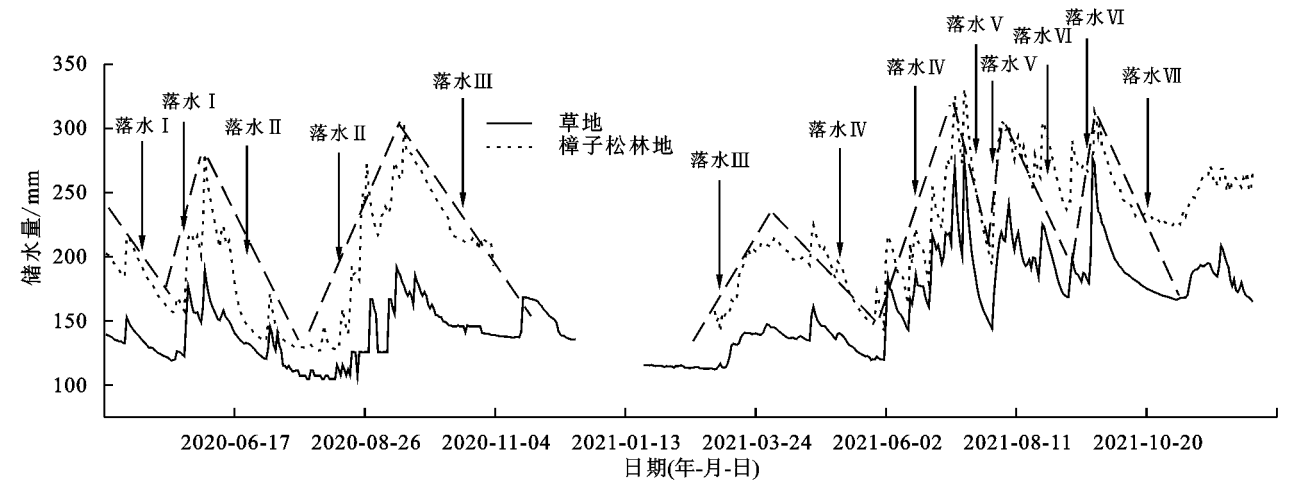


图 5 土壤储水量升落时段划分示意

2.6 土壤水盐对气象因子的响应

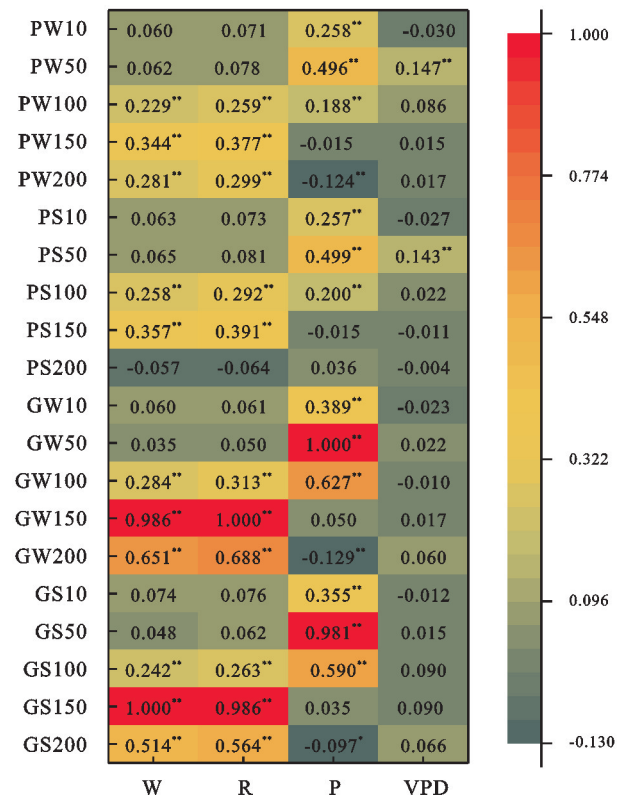
由 Pearson 相关分析(图 6)可知,草地、樟子松林地的土壤各分层水分、盐度指标与气象因子之间的相关性差异明显,气象因子与草地水分、盐度的相关系数更高。不同气象因子对各水分、盐度指标的影响

程度不同。土壤水分、盐度对降雨响应程度最高土层位于 50 cm;辐射和风速对土壤水分、盐度影响最强土层位于 150 cm;水汽压亏缺与土壤水分、盐度的相关性极低,樟子松 50 cm 处土壤水分与水汽压亏缺的相关系数最高(0.147),草地土壤水分、盐度与水汽压

亏缺相关系数均未达到显著水平。

表 3 土壤储水量浮动系数

研究时段	草地		樟子松林地	
	涨水浮动系数	落水浮动系数	涨水浮动系数	落水浮动系数
I	0.066	0.013	0.067	0.018
II	0.050	0.021	0.029	0.052
III	0.013	0.013	0.029	0.015
IV	0.061	0.010	0.058	0.023
V	0.060	0.042	0.060	0.035
VI	0.055	0.034	0.032	0.028
VII		0.010		0.010
平均值	0.051	0.020	0.044	0.026
全研究时段	0.030		0.026	



注:W 为风速;VPD 为饱和水汽压亏缺;R 为辐射;GW10 为土壤水分、盐度指标;G 为草地;P 为樟子松;W 为水分;S 为盐分;10 为土壤位置,10 cm 土壤;* 表示 $p<0.01$; ** 表示 $p<0.05$ 。

图 6 土壤水分、盐度与气象因子之间的 Pearson 相关性

3 讨论

3.1 樟子松人工林对土壤水分的影响

土壤水是气候、植被、地形及土壤因素等自然条件的综合反映,是沙地生态系统植被建设的基础条件^[14]。不同土地利用条件下水分循环是比较单纯的降雨入渗、地表蒸发和植物蒸腾的过程^[15],反映在剖面上的土壤水分具有一定的层次性和差异性。本研究发现,樟子松人工林改变土壤水分的空间分布,草地土壤纵向剖面水分特征曲线为反“S”形,含水量随着土层深度的增加而增加,樟子松林土壤纵向剖面水分特征曲线为正“S”形,含水量随着土层深度的增加而减小;相对于对照样地平均储水量提高 31.52%;樟

子松林地显著提高含水量变异性($p<0.05$)。结合其涨落水系数发现,樟子松人工林对非雨季的土壤储水量涨落浮动系数影响较大,进入雨季后,降雨对水分的影响遮盖掉二者之间的差异。王明明等^[16]研究发现,科尔沁沙地草地土壤含水量随着土层深度的增加而增加,且 3 种植被盖度的土壤纵向剖面水分特征曲线表现为反“S”形;徐畅等^[17]研究表明,沙地樟子松人工成熟林的土壤水分高于草地,过熟林土壤的含水量随土层加深呈“S”形变化曲线。可见,樟子松人工林明显地改变土壤水分分布和运移。

植物根系垂直分布特征反映植物对水分和盐分的利用范围^[17]。本研究发现,樟子松林地土壤水分活跃层较草地更深,二者相对稳定层相差不大,樟子松造林对土壤次活跃层影响最大,2020 年水分次活跃层 SD 降低,2021 年水分次活跃层消失。樟子松细根在 0—100 cm 土层的生物量占总细根生物量的 99.2%,0—40 cm 土层细根生物量占总细根生物量的 63.4%^[18],25—125 cm 恰好为樟子松树根主要分布深度^[19]。樟子松根系(尤其是细根)的分布特征与水分活跃层和次活跃层相近,因此根系吸收水分可能是形成草地与樟子松林地土壤水分活动层划分差异的主要原因。樟子松人工林地上植被以及覆被的凋落物层能减少表层土壤水分的消耗,二者表层(0—20 cm)土壤水分活跃层划分相同。表明樟子松根系分布是改变水分活动层的主要因子,土壤表层、深层土壤根系分布较少,其对水分活跃层的影响极小,樟子松人工林具有水源涵养、改良土壤、增加其持水的功能^[20]。

3.2 樟子松人工林对土壤盐度的影响

土壤中盐分的积累是通过土壤水、地下水运移进行再分配的结果^[21]。本研究发现,樟子松人工林改变土壤盐分的空间分布,草地土壤纵向剖面盐分特征曲线较为混乱,樟子松林土壤剖面盐分特征曲线表现为正“S”形,土壤盐度自上而下增减趋势与土壤水分相同,且均表现出明显的收敛现象;樟子松林地相对于草地平均盐度降低 11.3%;樟子松林地显著降低土壤盐度变异性($p>0.05$)。土壤盐度自上而下变化规律与众多研究结果相反^[21],这可能与当地土壤以风沙土为主,其沙粒表面积体积比较小、土壤有机质含量较低,与土壤水分、盐分吸附能力较弱有关,因此土壤盐分的分布规律与水分的分布规律一致,即“盐随水走”的规律。研究区气候干旱,降雨稀少,蒸发强烈,促使地下水中盐分向上运移^[22]。樟子松人工林遮挡减弱地表太阳辐射,因此樟子松林地土壤平均盐度低于草地土壤平均盐度。

3.3 土壤水分、盐度对气象因子的响应

气象因子是土壤水分的主要影响因素^[23],而水作为盐的载体直接影响土层盐分的变化。本研究发

关性低于草地,樟子松人工林通过改变该地区的立地条件,进而降低气象因子与土壤水分、盐度的联系程度。降雨对土壤水分、盐度影响最强位于 50 cm 土层,并随着土层深度的增加而减小,10 cm 土层土壤水分、盐度与气象因子相关系数低于 50 cm 土层,可能是样地存在干沙层阻挡一部分雨水入渗的缘故^[24]。本研究中,水汽压亏缺与樟子松林地 50 cm 处土壤水分、盐度的相关系数高于草地,大量研究^[25]表明,水汽压亏缺为植物液流的重要影响因子,因此樟子松林地土壤水分、盐度对降雨响应程度降低的原因可能是樟子松林地植物根系吸水强度高于草地。总之,樟子松人工林通过改变下垫面植被类型来改变气象因子与土壤水分、盐度的响应模式。

4 结论

(1)林地改变土壤水分的空间分布,有效提高土壤储水量和变异性($p < 0.05$)。

(2)水分纵向分布线形从反“S”形变成正“S”形,平均储水量提高 31.52%;降低土壤水分次活跃层范围,增加水分活跃层和相对稳定层范围;林地对储水浮动系数的影响具有季节差异性,极大地提高非雨季(3—5 月)的土壤储水涨落浮动系数,分别提高 2.23,2.30 倍;樟子松林地降低土壤水分对降雨的响应程度。

(3)林地影响土壤盐度,土壤平均盐度下降 11.30%,林地盐度纵向分布线呈现正“S”形,且对盐度变异性影响不显著,樟子松林地降低土壤盐分对降雨的响应程度。综上所述,樟子松林可改变表层土壤的气象因子和植被群落,导致土壤水分、盐度变化规律发生变化。

参考文献:

- [1] 慈龙骏.全球变化对我国荒漠化的影响[J].自然资源学报,1994,9(4):289-303.
- [2] 王涛,朱震达.中国沙漠化研究[J].中国生态农业学报,2001,9(2):7-12.
- [3] Wang T, Zhu Z D, Wu W. Sandy desertification in the north of China[J].Science in China(Series D: Earth Sciences),2002,45(1):23-34.
- [4] 党宏忠,张学利,韩辉,等.樟子松固沙林林—水关系研究进展及对营林实践的指导[J].植物生态学报,2022,46(9):971-983.
- [5] 姜凤岐,曾德慧,于占源.从恢复生态学视角透析防护林衰退及其防治对策:以章古台地区樟子松林为例[J].应用生态学报,2006,17(12):2229-2235.
- [6] Dang H Z, Lu P, Yang W B, et al. Drought-induced reductions and limited recovery in the radial growth, transpiration, and canopy stomatal conductance of Mongolian Scots pine (*Pinus sylvestris* var. *mongolica* Litv.): A five-year observation[J].Forests,2019,10:e1143.
- [7] 宋立宁,朱教君,郑晓.基于沙地樟子松人工林衰退机制的营林方案[J].生态学杂志,2017,36(11):3249-3256.
- [8] 焦树仁.辽宁省章古台樟子松固沙林提早衰弱的原因与防治措施[J].林业科学,2001,37(2):131-138.
- [9] 杜学军,闫彬伟,许可,等.盐碱地水盐运移理论及模型研究进展[J].土壤通报,2021,52(3):713-721.
- [10] 刘普幸,姚晓军,张克新,等.疏勒河中下游胡杨林土壤水盐空间变化与影响[J].水科学进展,2011,22(3):359-366.
- [11] 白浩楠,牛香,王兵,等.毛竹扩展对鹿角杜鹃叶内生真菌群落多样性的影响[J].生态学杂志,2021,40(12):3849-3859.
- [12] Wei X H, Liu W F, Zhou P C. Quantifying the relative contributions of forest change and climatic variability to hydrology in large watersheds: A critical review of research methods[J].Water,2013,5(2):728-746.
- [13] 郎明翰,王希臣,满秀玲,等.大兴安岭多年冻土区森林小流域基流分割[J].东北林业大学学报,2021,49(5):90-96,104.
- [14] 马婧怡,贾宁凤,程曼.黄土丘陵区不同土地利用方式下土壤水分变化特征[J].生态学报,2018,38(10):3471-3481.
- [15] 周宏.干旱区包气带土壤水分运移能量关系及驱动力研究评述[J].生态学报,2019,39(18):6586-6597.
- [16] 王明明,刘新平,李玉霖,等.不同植被盖度沙质草地生长季土壤水分动态[J].中国沙漠,2019,39(5):54-61.
- [17] 徐畅,雷泽勇,周凤艳,等.沙地樟子松人工林生长对非降雨季节土壤水分的影响[J].生态学杂志,2021,40(1):58-66.
- [18] Meng P, Zhang B X, Wang M. Biomass distribution and architecture of roots in *Pinus densiflora* and *Pinus sylvestris* var. *mongolica* in Horqin Sandy Land[J].Chinese Journal of Ecology,2018,37:2935-2941.
- [19] Musa A L, Zhang Y H, Cao J, et al. Relationship between root distribution characteristics of Mongolian pine and the soil water content and groundwater table in Horqin Sandy Land, China[J].Trees,2019,33(4):1203-1211.
- [20] Wang Z Y, Cao J S, Yang H. Multi-time scale evaluation of forest water conservation function in the semi-arid mountains area[J].Forests,2021,12(2):e116.
- [21] 刘小燕,刘巧玲,刘廷玺,等.科尔沁草甸地冻融期土壤水热盐动态迁移规律[J].水科学进展,2015,26(3):331-339.
- [22] 刘丽娟,李小玉.干旱区土壤盐分积累过程研究进展[J].生态学杂志,2019,38(3):891-898.
- [23] Zhang Y, Zhang B B, Xu Q, et al. The effects of plant and soil characteristics on partitioning different rainfalls to soil in a subtropical Chinese fir forest ecosystem[J].Forests,2022,13(1):e123.
- [24] 杨文斌,唐进年,梁海荣,等.我国典型沙漠(地)流动风沙土的深层渗漏量及动态变化[J].中国科学:地球科学,2014,44(9):2052-2061.
- [25] 张璇,张会兰,王玉杰,等.缙云山典型树种树干液流日际变化特征及与气象因子关系[J].北京林业大学学报,2016,38(3):11-20.