

科尔沁沙地奈曼沙区小叶杨防护林带间 植被与土壤特性变化

郭欣宇¹, 杨光¹, 李庆和², 薛艳春¹, 温雅琴³, 杨溢文⁴

(1.内蒙古农业大学 沙漠治理学院 荒漠生态系统保护与修复国家林业和草原局重点实验室, 内蒙古呼和浩特 010018; 2.内蒙古自治区水利事业发展中心, 内蒙古 呼和浩特 010020; 3.呼和浩特市水资源与河湖保护中心, 内蒙古 呼和浩特 010020; 4.内蒙古自治区林业科学研究院 草原研究所, 内蒙古 呼和浩特 010010)

摘要: [目的] 以科尔沁沙地奈曼沙区小叶杨(*Populus simonii*)防护林为研究区域, 研究防护林带间植被修复与土壤发育的最适行带配置模式, 为科尔沁沙地人工造林提供科学依据。[方法] 对4种不同带间距的行带式小叶杨防护林带间植物群落多样性、土壤理化性质及其相关性进行研究。[结果] 带间距的大小对小叶杨防护林带间植被与土壤恢复有明显影响, 植被恢复与土壤恢复是相辅相成的。①自然状态下防护林带间物种多样性及群落稳定性具体表现为: 带间距 10 m > 6 m > 4 m > 2 m; ②土壤含水量及土壤养分(有机碳、碱解氮、速效磷、速效钾)含量表现为: 带间距 10 m > 6 m > 4 m > 2 m, 土壤容重为: 带间距 10 m < 6 m < 4 m < 2 m; ③在0—60 cm土层深度中, 不同带间距小叶杨防护林带间物种多样性指数与土壤理化性质呈现出不同程度的显著或极显著相关($p < 0.05$), 其中与各物种多样性指数相关性最大的为土壤容重, 与各土壤理化性质相关性最明显的物种多样性指数为 Margalef 丰富度指数。[结论] 在科尔沁沙地奈曼沙区小叶杨人工造林过程中, 适当增大行带式小叶杨造林带间距, 能够有效提高林地生产水平与生态效益。综合考虑带间植被与土壤恢复, 造林带间距达到 10 m 为宜。

关键词: 科尔沁沙地; 行带式人工林; 物种多样性; 土壤理化性质

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2022)06-0129-08

中图分类号: S775, Q948

文献参数: 郭欣宇, 杨光, 李庆和, 等. 科尔沁沙地奈曼沙区小叶杨防护林带间植被与土壤特性变化[J]. 水土保持通报, 2022, 42(6): 129-136. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2022.06.017; Guo Xinyu, Yang Guang, Li Qinghe, et al. Changes in vegetation and soil properties between shelterbelts of *Populus simonii* in Naiman sand zone of Horqin sandy land area [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2022, 42(6): 129-136.

Changes in Vegetation and Soil Properties Between Shelterbelts of *Populus Simonii* in Naiman Sand Zone of Horqin Sandy Land Area

Guo Xinyu¹, Yang Guang¹, Li Qinghe², Xue Yanchun¹, Wen Yaqin³, Yang Yiwen⁴

(1. Key Laboratory of Desert Ecosystem Conservation and Restoration, State Forestry and Grassland Administration of China, College of Desert Science and Engineering, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot, Inner Mongolia 010018, China; 2. Inner Mongolia Autonomous Region Water Conservancy Development Center, Hohhot, Inner Mongolia 010020, China; 3. Hohhot Water Resources and River and Lake Protection Center, Hohhot, Inner Mongolia 010020, China; 4. Grassland Research Institute, Inner Mongolia Academy of Forestry Sciences, Hohhot, Inner Mongolia 010010, China)

Abstract: [Objective] The most suitable row-band configuration pattern was determined for vegetation restoration and soil development between protection forest strips in the *Populus simonii* shelterbelt located

收稿日期: 2022-03-20

修回日期: 2022-04-20

资助项目: 内蒙古自治区科技重大专项课题“沙地生态系统近自然修复技术研究及产业化示范”(2019ZD003-2)

第一作者: 郭欣宇(1996—), 女(满族), 内蒙古自治区呼伦贝尔市人, 硕士研究生, 研究方向为水土保持与荒漠化防治。Email: gxy96913@126.com。

通讯作者: 杨光(1974—), 男(汉族), 内蒙古自治区鄂尔多斯市人, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事水土保持与荒漠化防治等方面的研究。Email: yg331@126.com。

in the Naiman sand region of the Horqin sandy land area to provide a scientific basis for artificial afforestation in this area. [Methods] Plant community diversity, soil physicochemical properties, and their correlation for four types of *Populus simonii* shelterbelts with different band spacings were studied. [Results] The size of the band spacing had a significant impact on the vegetation and soil restoration between *Populus simonii* shelterbelts, and vegetation restoration and soil restoration were complementary. ① Species diversity and community stability in the natural state showed some decrease by the distance between bands from 10 m, 6 m, 4 m, to 2 m; ② Soil water content and soil nutrient contents (organic matter, alkaline hydrolyzable nitrogen, fast-acting phosphorus, and fast-acting potassium) presented the same downward trend from 10 m, 6 m, 4 m, to 2 m, but the soil bulk density showed an upward trend from 10 m, 6 m, 4 m, to 2 m; ③ In the 0—60 cm soil layer, species diversity indices and soil physicochemical properties showed significant or highly significant correlations ($p < 0.05$) between the different band spacings of *Populus simonii*, among which the most significant correlation with each species diversity index was the soil bulk density, and the most significant correlation with each soil physicochemical property was the Margalef richness index. [Conclusion] For the artificial afforestation process of *Populus simonii* in the Naiman sand region of the Horqin sandy land area, an appropriate increase in the spacing between row-banded small-leaved poplar plantations can effectively improve the production level and ecological benefits of the forest land, and a spacing of 10 m is appropriate.

Keywords: Horqin sandy land; row belt plantation; species diversity; physical and chemical properties of soil

科尔沁沙地是中国面积最大的沙地,其土地荒漠化问题严重,作为半干旱农牧交错带的典型代表区域,为降低风速,涵养水源,固定流沙,有效减少水土流失,20世纪70年代至今科尔沁沙地营造了大面积的杨树人工防护林^[1-2]。其中,在科尔沁沙地通辽市营造的杨树人工林面积占内蒙古人工林面积1/3以上,占全国杨树人工林面积的1/10,在林业建设中通辽地区杨树人工林的建设具有主导地位^[3]。然而,由于种植密度与结构不合理,造林过程中出现了杨树衰败、枯死,形成了大面积低产低效林^[4]。在林分生长的过程中,林下植被对土壤质量和养分循环有着重要影响,研究表明,林下的植被组成及多样性直接或间接导致土壤理化性质等^[5-7]变化;土壤作为植物生存的基础,也对植物群落的结构和功能起到不可忽视的作用^[8-9],土壤的理化性质对植物个体,林下植被物种组成及结构均有显著影响^[10-12],植被—土壤系统互相作用的机理是控制生态系统过程的重要机制^[13-14]。防护林的营造对林下植被与土壤有显著影响^[15-16],防护林造林最适格局的研究是减缓土地退化的重要内容^[17],诸多学者对于人工林植被与土壤特性的研究主要侧重在不同的林草地、农田、荒裸地中两者相互作用的影响或不同造林树种、不同植被恢复类型的比较上,在干旱、半干旱区探究合理造林模式与林下土壤和植被特性关系的研究并不多见。

中国林科院和内蒙古林科院在干旱区进行调查研究时发现,干旱区、半干旱区受水分制约,行带式水平配置结构造林对水分利用更为合理,且在同等密度

条件下,行带式配置结构营造的人工林的防风固沙效果优于随机分布和等株行距分布^[18-19];这种行带式的造林配置与早年国外研究中提及的干旱、半干旱区“二相镶嵌”等植被景观模式类似,但国外这类报道对该模式的研究主要围绕间距与带宽的比与降水量之间的关系^[20-21];中国以杨文斌为代表的学者提出了干旱、半干旱区低覆盖度治沙的理念,其研究认为低覆盖度行带式固沙林能够有效改善沙地生态环境^[22-23];在此基础上,姜丽娜^[24]以科尔沁沙地的敖汉沙区为研究区,以“两行一带”低覆盖度杨树固沙林为对象,研究了不同带宽对土壤及植被修复的影响,结果表明行带式固沙林的不同带宽可以影响和调节植被与土壤间的相互作用。因此,本文以科尔沁沙地南缘的通辽市奈曼旗沙区为研究区,以当地最具代表性的“一行一带”式小叶杨(*Populus simonii*)人工防护林为研究对象,对不同带间距带间植被恢复、土壤理化性质关系进行研究,提出适宜当地更有效的带间植被修复与土壤发育的行带式配置结构模式,对科尔沁沙地人工林科学造林具有重要的理论和实践意义。

1 研究区概况

本文试验的研究区位于科尔沁沙地南缘的内蒙古通辽市奈曼旗(120°19′40″—121°35′40″E,42°14′40″—43°32′20″N),气候属于北温带大陆性季风干旱气候,年平均气温6.0~6.5℃,平均降水量366mm,春季风向以西南风为主,夏季多为东南风,其年平均风速

为 3.6~4.1 m/s^[1-2];研究区土地沙漠化严重,南部黄土区主要是第四纪残积物、坡洪冲积物以及风积物组成,中部沙区和北部冲积平原区主要是冲积物、风积物和湖积物组成,主要土壤类型包括风沙土、栗钙土、草甸土等;研究区主要植被类型有差巴嘎蒿 (*Artemisia halodeudron*)、小叶锦鸡儿 (*Caragana microphylla*)、黄柳 (*Salix gordejvii*)、沙蓬 (*Agriophyllum squarrosum*)、达乌里胡枝子 (*Lespedeza davurica*)、狗尾草 (*Setaria viridis*)、猪毛菜 (*Salsola collina*) 等^[25-26]。

2 研究方法

2.1 样地设置与调查

于 2021 年 7 月在研究区选择立地条件相同,造林年限相近的带间距为 10,6,4,2 m 的典型“一行一带”式小叶杨人工防护林各 2~3 个作为预试验样地,所选样地带间均为未经开垦的天然恢复植被,选择当地地带性植被的旷野作为对照样地;对每个样地设置 30 m×30 m 的乔木样方,通过每木检尺的方法调查样方内乔木的树高、基径、胸径、冠幅等;使用样方法对带间草本进行调查(尽量保证所有样方能

够覆盖试验样地所有植物种),草本样方的大小为 1 m×1 m,记录样方内植物种类、高度、盖度、频度等。预试验过程中草本样方与土壤取样点均为对角线三点取样,通过预试验对比发现,相同带间距的防护林植被与土壤试验数据高度相似,因此在其中选择具有代表性的不同带间距样地各一个作为最终试验样地,最终试验样地的草本样方与土壤为五点取样法,样地设置与取样示意图如图 1 所示(以 10 m 带间距样地为例),研究区防护林带基本群落特征详见表 1。

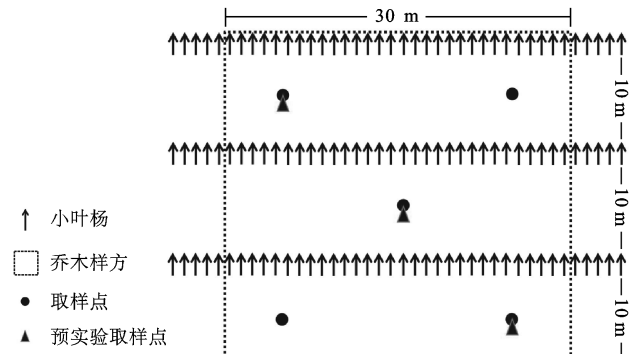


图 1 样地设置与取样示意图

表 1 研究区防护林带基本群落特征描述

样地编号	株行距(m×m)	造林年份	平均树高/m	平均胸径/cm	平均冠幅直径/cm	林下植被盖度/%
小叶杨 1	1×2	1999	8.35±0.62	10.3±0.93	220±19.24	21.6
小叶杨 2	1×4	1999	9.63±0.8	12.85±0.87	289.5±29.58	25.4
小叶杨 3	1×6	2000	10.22±0.58	16.35±1.22	340±27.2	28
小叶杨 4	1×10	2002	13.65±0.85	20.2±1.39	402.5±29.47	34.6
旷野对照						67.2

注:数据为平均值±标准差。下同。

2.2 土壤样品采集与测定

土壤样品采集采取剖面法,取样点与取样时间均与草本样方相同,分 3 层取样,分别为 0—20,20—40,40—60 cm。将土壤样品带回实验室,相同土层土样进行混合,每组重复试验 3 次;采用 NaHCO₃ 浸提钼锑抗比色法测定速效磷、NH₄OAc 浸提,火焰光度法测定速效钾,碱解扩散法测定碱解氮,重铬酸钾容量法(外加热法)测定有机碳。

2.3 数据处理与分析

2.3.1 重要值计算 选用重要值作为种群优势度指标能够表征发育过程中种群在防护林中的分布格局和功能地位。

重要值(IV):

$$IV = (RHI + RDE + RFE) / 3 \quad (1)$$

式中:RHI 为相对高度;RDE 为相对密度;RFE 为

相对频度。

2.3.2 多样性指数计算 根据前人^[27-30]对物种多样性的研究成果,选用 Simpson 多样性指数、Shannon-Wiener 物种多样性指数;Pielou 均匀度指数;Margalef 丰富度指数来研究不同带间距杨树人工防护林的群落物种多样性变化。

2.3.3 统计与分析 使用 Excel 进行数据处理与绘图,使用 SPSS 26.0 软件进行单因素方差分析(ANOVA)检验与相关性分析,分析不同带间距土壤理化性质的差异性及其带间植被多样性与土壤理化性质间的相关性。

3 结果与分析

3.1 带间物种组成与多样性分析

研究区不同带间距小叶杨防护林和对照样地物

种组成与重要值详见表 2。随着防护林带间距的增大,植物种类数量、一年生与多年生草本数量随之增加;2 m 与 4 m 带间距防护林优势植物种均为一年生植物,说明带间距窄的防护林物种组成较为简单,群落稳定性较低;6 m 带间距防护林中多年生植物在群落中逐渐发挥重要作用;10 m 带间距防护林优势种为一年生植物狗尾草与多年生植物甘草、达乌里胡枝子,说明 10 m 带间距的小叶杨防护林在物种组成、植被恢复程度、群落稳定性上都明显优于 6 m,4 m,2 m 带间距小叶杨防护林。

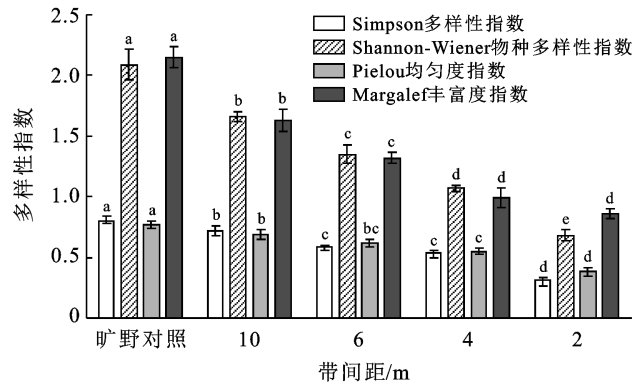
表 2 不同带间距杨树防护林带间物种重要值

植物种类	带间距/m				旷野对照
	2	4	6	10	
地锦草	6.37	15.79	3.19	7.11	5.18
甘草				15.24	3.76
灰绿藜			14.61	4.13	4.82
狗尾草	52.9	44.49	38.88	31.83	23.74
猪毛菜	15.8	9.44	5.40	4.90	2.99
碱蒿	12.85	10.89		4.58	1.86
山苦荬		8.03	6.30	8.61	4.16
地稍瓜				4.31	2.38
达乌里胡枝子	7.89	8.08	6.82	11.09	8.08
野大麻				2.51	7.45
地肤		3.28	11.14	5.68	5.68
芦苇					7.01
赖草					3.91
蒺藜			3.59		3.69
差巴嘎蒿	4.20		10.08		15.30
植物种数	6.00	7.00	9.00	11.00	15.00
一年生草本数	4.00	5.00	6.00	7.00	8.00
多年生草本数	2.00	2.00	3.00	4.00	7.00

注:表中各植物学名分别为地锦草(*Euphorbia humifusa*),甘草(*Glycyrrhiza uralensis*),灰绿藜(*Chenopodium glaucum*),碱蒿(*Artemisia anethifolia*),山苦荬(*Ixeris chinensis*),地稍瓜(*Cynanchum thesioides*),野大麻(*Cannabis sativa*),地肤(*Kochia scoparia*),芦苇(*Phragmites australia*),赖草(*Leymus secalinus*),蒺藜(*Tribulus terrestris*)。

如图 2 所示,不同带间距小叶杨防护林多样性指数的变化表现为:带间距 10 m > 6 m > 4 m > 2 m,10 m 带间距与 2 m 带间距相比 Simpson 多样性指数高 0.41,Shannon-Wiener 物种多样性指数高 0.98,Pielou 均匀度指数高 0.31,Margalef 丰富度指数高 0.77,试验涉及的几种带间距的防护林都远低于旷野对照样地,这说明以上几种带间距的小叶杨防护林的植被恢复仍然在初期阶段,植被恢复想要接近地带性植被仍是一个漫长的过程,带间距为 10 m 的防护林植被相比于其他几种带间距更有利于带间物种多样性的增加与植被的恢复。综上所述,以上几种带间距的

行带式小叶杨防护林随着造林带间距的增加,物种多样性指数增大,群落稳定性增强。



注:图中相同小写字母表示同一指数不同样地间差异不显著($p < 0.05$)。下同。

图 2 不同带间距防护林带间物种多样性变化

3.2 带间土壤物理性质变化

不同带间距小叶杨防护林 0—60 cm 土壤物理性质详见表 3。由表 3 可知,在所有样地中 0—60 cm 土壤含水量依次表现为:2 m < 4 m < 6 m < 10 m < 旷野对照,同一样地不同土层土壤含水量依次表现为:0—20 cm < 20—40 cm < 40—60 cm,且这种趋势随着带宽的增加而增加,这主要是因为表层土的土壤含水量受地表环境中的风速、温度、湿度等因素影响蒸发较快;从方差分析结果可以看出,在 0—20 cm 土层中,2 m,4 m,6 m 带间距杨树防护林带间土壤含水量无显著性差异($p > 0.05$),在 40—60 cm 土层中,各样地之间均有显著性差异($p < 0.05$),这说明,在表层土中带间距为 2 m,4 m,6 m 的样地土壤含水量相近,但与 10 m 带间距样地仍有差距;从变异系数上看,10 m 带间距的土壤含水量在各个土层中的变化幅度更稳定。综上所述,在以上几种带间距的小叶杨防护林中带间土壤含水量随土层深度的加深而增加,随带间距的增大而增加。不同带间距小叶杨防护林 0—60 cm 土层的土壤容重依次表现为:2 m > 4 m > 6 m > 10 m > 旷野对照,同一样地不同土层土壤容重依次表现为:0—20 cm < 20—40 cm < 40—60 cm,这是因为植树造林,植被恢复,土壤表层分布着大量的植物根系,因此表层土壤较为松散,土壤容重较小;从方差分析结果上看,在所有不同样地中,10 m 带间距的防护林最接近旷野对照样地;从变异系数的变化中可以看出,较宽的带间距土壤容重变异幅度最大,说明该带间距对土壤恢复的作用最明显,综上所述,在以上几种带间距的小叶杨防护林中带间土壤容重随带间距的增大而减小。

表 3 杨树防护林带间土壤水分含量及容重的描述性统计

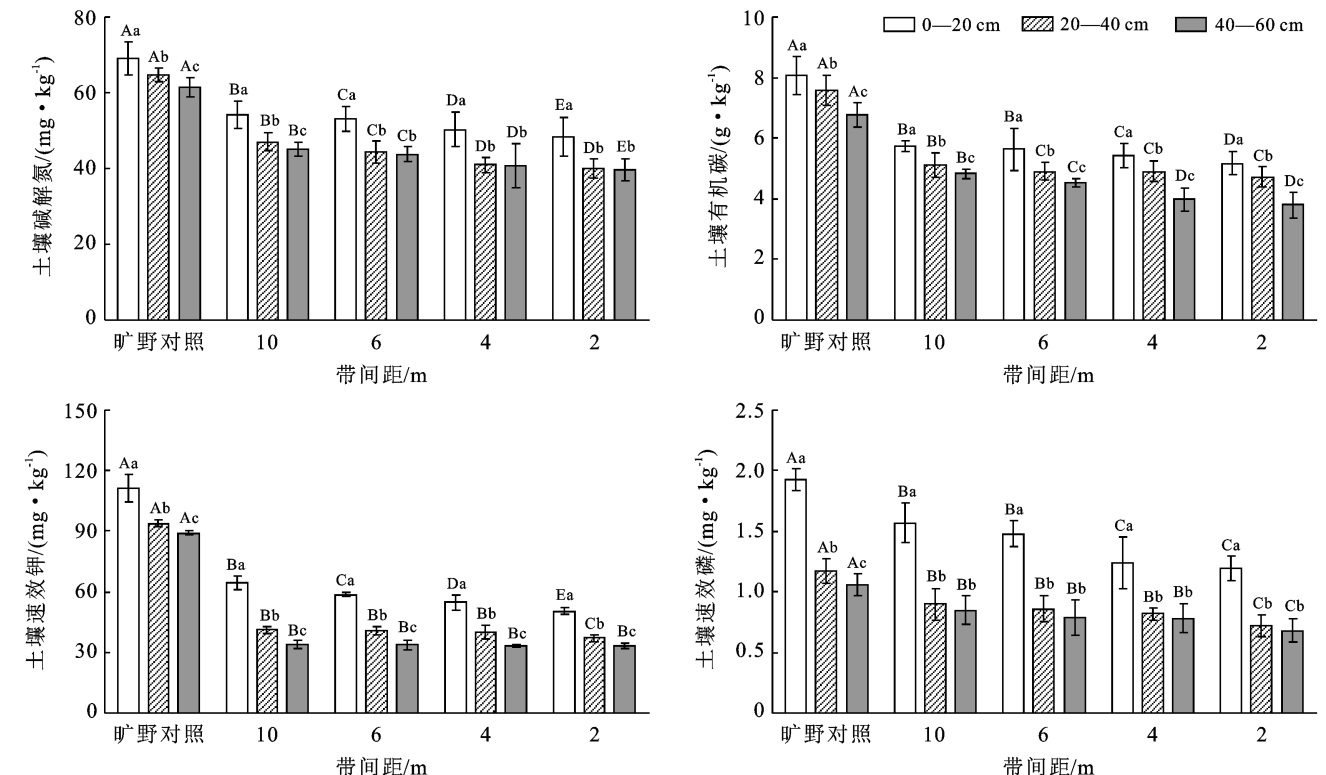
物理性质	土层深度/cm	旷野对照	带间距			
			10 m	6 m	4 m	2 m
土壤含水量/%	0—20	11.84±0.04 ^{Aa}	7.18±0.07 ^{Ba}	5.33±0.25 ^{Ca}	5.25±0.19 ^{Ca}	5.20±0.08 ^{Ca}
	20—40	13.09±0.03 ^{Ab}	8.99±0.11 ^{Bb}	7.29±0.10 ^{Cb}	5.33±0.11 ^{Da}	5.23±0.11 ^{Da}
	40—60	16.30±0.18 ^{Ac}	10.06±0.11 ^{Bc}	8.61±0.06 ^{Cc}	7.57±0.33 ^{Db}	6.26±0.33 ^{Eb}
变异系数/%	0—20	0.36	0.98	4.67	3.62	1.60
	20—40	0.25	1.19	1.34	2.13	2.13
	40—60	1.09	1.06	0.64	4.39	5.32
土壤容重/(g·cm ⁻³)	0—20	1.32±0.06 ^{Aa}	1.38±0.03 ^{Ba}	1.46±0.01 ^{Ca}	1.52±0.02 ^{CDa}	1.57±0.02 ^{Da}
	20—40	1.37±0.07 ^{Ab}	1.47±0.02 ^{Bb}	1.56±0.02 ^{Cb}	1.59±0.03 ^{Cb}	1.67±0.03 ^{Db}
	40—60	1.43±0.06 ^{Ab}	1.52±0.01 ^{Bb}	1.63±0.01 ^{Cc}	1.70±0.02 ^{Dc}	1.75±0.03 ^{Dc}
变异系数/%	0—20	4.74	2.33	0.99	1.25	1.22
	20—40	5.24	1.40	1.60	1.74	1.89
	40—60	4.52	0.40	0.66	1.34	1.57

注:表中相同大写字母表示样地间差异不显著,相同小写字母表示同一样地不同土层差异不显著($p < 0.05$)。

3.3 带间土壤化学性质变化

不同带间距小叶杨防护林的土壤化学性质变化如图 3 所示,在 0—60 cm 深度土层上,土壤有机碳、碱解氮、速效磷、速效钾的含量均表现为:旷野对照 > 10 m > 6 m > 4 m > 2 m;其中有机碳含量在表层土壤中 6 m 与 10 m 带间距无显著差异($p > 0.05$),在深层土壤中 2 m, 4 m, 6 m 带间距无显著差异($p > 0.05$);土壤碱解氮含量在 20—60 cm 土层中 2 m, 4 m, 6 m 带间距无显著差异($p > 0.05$),这种规律与有机碳表现相近,

这是由于碱解氮含量与有机质含量密切相关;土壤速效磷含量与土壤速效钾含量在深层土壤中差异性规律不明显,这主要是由于速效磷和速效钾主要积累在耕层土壤中,因此不同样地的表层土壤规律与差异更显著($p < 0.05$);从总体上看,不同带间距小叶杨防护林的有机碳和碱解氮含量随土层的加深而减小,随带间距的增大而增大,速效磷和速效钾的含量在表层土中随带间距的增大而增大,在深层土壤中表现出先降低后趋于平缓的规律,各样地差异性不显著($p > 0.05$)。



注:图中相同大写字母表示样地间差异不显著,相同小写字母表示同一样地不同土层差异不显著($p < 0.05$)。

图 3 杨树防护林带间土壤养分含量及变化

3.4 带间植被多样性与土壤理化性质的相关性

对不同带间距小叶杨防护林带间物种多样性指数与不同土层深度的土壤理化性质进行 Pearson 相关分析,结果详见表 4。由表 4 可知,在 0—60 cm 土层深度中,土壤容重与 Simpson 多样性指数、Pielou 均匀度指数显著负相关 ($p < 0.05$),与 Shannon-Wiener 物种多样性指数、Margalef 丰富度指数极显著负相关 ($p < 0.01$);土壤含水量与 Margalef 丰富度指

数的相关性随土层深度的增加而上升,与 Shannon-Wiener 物种多样性指数在 20—60 cm 土层显著正相关 ($p < 0.05$);速效磷与各多样性指数呈显著或极显著正相关 ($p < 0.05$),速效钾的相关性规律不明显;碱解氮与 Shannon-Wiener 物种多样性指数和 Margalef 丰富度指数显著正相关 ($p < 0.05$);在表层土壤中 Margalef 丰富度指数与各项土壤理化性质均呈显著或极显著正相关 ($p < 0.05$)。

表 4 物种多样性指数与土壤理化性质的相关关系分析

土层深度/ cm	多样性指数	土壤含水量/ %	土壤容重/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	有机碳/ ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	碱解氮/ ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	速效磷/ ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	速效钾/ ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)
0—20	Simpson	0.759	-0.956*	0.747	0.799	0.892*	0.762
	Shannon-Wiener	0.865	-0.996**	0.852	0.897*	0.970**	0.867
	Pielou	0.761	-0.960*	0.762	0.815	0.909*	0.773
	Margalef	0.926*	-0.993**	0.902*	0.940*	0.994**	0.919*
20—40	Simpson	0.861	-0.952*	0.702	0.785	0.877	0.666
	Shannon-Wiener	0.951*	-0.990**	0.815	0.891*	0.944*	0.784
	Pielou	0.872	-0.954*	0.713	0.799	0.888*	0.680
	Margalef	0.991**	-0.985**	0.874	0.943*	0.959**	0.846
40—60	Simpson	0.849	-0.934*	0.826	0.778	0.896*	0.626
	Shannon-Wiener	0.933*	-0.989**	0.923*	0.883*	0.951*	0.753
	Pielou	0.858	-0.942*	0.842	0.793	0.900*	0.641
	Margalef	0.965**	-0.999**	0.966**	0.936*	0.959*	0.826

注: * 表示显著相关; ** 表示极显著相关。

4 讨论与结论

4.1 讨论

4.1.1 不同带间距小叶杨防护林带间植被特性的差异 行带式防护林带间距的宽窄差异从一定程度上来讲是造林密度的差异,对任何防护林来说,植被的恢复都是漫长而复杂的过程,科尔沁沙地土壤水分含量少、养分较为贫瘠,过密的种植导致了植物生长之间激烈的竞争。杨树本身根系吸水能力强,尽管部分学者认为杨树不适宜应用在干旱地区造林,但研究发现适宜栽植密度的杨树林带对于干旱区自然植被修复和土壤发育有明显的促进作用^[24]。一方面较宽的带间距减少了防护林本就稀少的水分和养分竞争,另一方面更宽的带间距降低了杨树林的郁闭度,遮荫面的减少让地面低矮的生活型植被可以得到更多的光源,光补偿能促使植被更好地进行光合作用,也提高了土壤温度,从而达到促生效果,同时造林间距变大使冠层对降水的截留能力减弱,草本能够更好地吸收天然降水。在中国许多干旱、半干旱地区营造的乔木、灌木防护林、人工林、固沙林,经过漫长的自然演替过程,都逐渐形成了覆盖度较低的植被群落^[31]。

4.1.2 不同带间距小叶杨防护林带间土壤特性的差异 随着行带式小叶杨防护林的生长,带间土壤有机碳、碱解氮、速效磷、速效钾的含量均随着带宽的增加而增大,这主要是由于在防护林生长的过程中地表植被生长的变化、枯落物覆盖程度的不同,改变了土壤的微环境,提高了土壤的保水保肥能力,减缓了土壤水分蒸发和有机质的分解,其中土壤容重与土壤含水量大小与土壤有机质含量密切相关,土壤有机质不仅能够促进土壤团聚体的形成,其本身也是疏松多孔的结构,能够有效提高土壤的通气性和吸水能力^[32];较宽的带间距土壤养分含量更高,带间植被群落物种多样性较为丰富,植物根系数量更多,分布更密集更广泛,使土壤更松散,孔隙度更大,土壤吸水能力更强,这也在一定程度上提高了土壤含水量和土壤容重,这种植被物种多样性与土壤理化性质之间的相互作用关系也在本文的相关性研究中得到验证。

4.1.3 小叶杨防护林带间植被与土壤恢复的最适行带配置模式 在距离奈曼旗较近且同为科尔沁沙地的赤峰市敖汉旗沙区,杨文斌等学者^[22]提倡的低覆盖度造林已取得显著成效,其研究认为更宽的带间距不仅有利于带间植被和土壤恢复,还能使干旱区土壤水

分得到合理利用,提高固沙林的防风效果。杨文斌等人^[18,23]在对固沙林带间植被和土壤恢复的相关研究结果与本文一致。姜丽娜^[24]在敖汉旗沙区对造林年限为10 a左右的不同带间距“两行一带”杨树固沙林进行研究发现宽带间距可以明显加快土壤及植被修复的速度,不同带间距行带式固沙林土壤植被恢复效果随带宽的增大而提升,这种规律与本文的研究结果一致,但其研究认为科尔沁沙地敖汉旗沙区最适宜的造林模式为20 m带间距的“两行一带”造林模式,但通过实地调查发现,同为科尔沁沙地南缘的通辽市奈曼旗沙区鲜有10 m或10 m以上低覆盖度行带式固沙林,“一行一带”式为现阶段的主要造林模式。石星对敖汉沙区的赤峰杨固沙林研究发现低覆盖度固沙林对带间小气候存在一定影响,低覆盖度行带式固沙林不仅能够降低空气温度,增加带间相对湿度,还能够阻挡带间太阳辐射^[33]。对于带间生长的植被来说近地层大气温湿度是其生长生存的重要条件,本文试验研究中最接近低覆盖度固沙林的为带间距10 m的小叶杨防护林,尽管由于其株距过小,并没有达到真正意义上的低覆盖,但与带间距更小的防护林相比,10 m带间距小叶杨防护林在带间植被与土壤的恢复上体现了明显的优势。小叶杨作为当地防护林最主要的造林树种,一直以来都面临着“小老树”问题,内蒙古林科院的闫德仁^[3]就科尔沁沙地杨树防护林衰退原因进行探讨发现,包括奈曼旗在内的科尔沁沙地地区普遍存在着造林密度过大问题,种植密度已经远远超过当地降水与自然水位承载的范围,这成为了加速防护林衰败死亡的重要原因。杨文斌等人^[34]认为当人工固沙林的覆盖率过高时,深层土壤或地下水的补给无法通过降水实现,但行带式低覆盖度固沙林的设计确保了降水的渗漏与补给,保证了人工林能够长久且稳定地生长发育。结合本文与诸多学者研究,可见密植并不适用于干旱、半干旱区人工造林,改变固有造林模式,是提高林地生产水平的重要途径。宽带间距的行带式造林相对更适宜科尔沁沙地的生态环境,增加行带宽度总体有利于带间植被与土壤的恢复与稳定,在日后奈曼沙区的防护林造林过程中应该考虑摒弃传统的密植,探索低覆盖度造林新模式防沙治沙,适当增大行带式防护林造林带间距,使人工防护林更有效地发挥其水土保持效益。

4.2 结论

(1) 行带式小叶杨防护林的带间距大小对带间植被的恢复有明显的影 响,在自然状态下,10 m带间距的防护林在带间物种组成、植被恢复程度、物种多样性指数上都明显优于带间距为6,4,2 m的防护林。

(2) 带间距为10 m的小叶杨防护林对带间土壤修复的促进作用比带间距为6,4,2 m的防护林更明显,防护林带间土壤含水量及土壤养分随着带间距的增加而增大,土壤容重随带间距的增大而减小。

(3) 在0—60 cm土层深度中,不同带间距小叶杨防护林带间物种多样性指数与土壤理化性质呈现出不同程度的显著或极显著相关($p < 0.05$),其中与各物种多样性指数相关性最大的为土壤容重,与各土壤理化性质相关性最明显的物种多样性指数为Margalef丰富度指数,说明植被恢复与土壤恢复是相辅相成的。因此在科尔沁沙地奈曼沙区小叶杨人工造林过程中,综合考虑带间植被与土壤恢复,行带式造林带间距达到10 m为宜。

[参 考 文 献]

- [1] 杨爱国,付志祥,王玲莉,等.科尔沁沙地杨树水分利用策略[J].北京林业大学学报,2018,40(5):63-72.
- [2] Wang Kai, Zhang Risheng, Song Lining, et al. Comparison of C : N : P stoichiometry in the plant-litter-soil system between poplar and elm plantations in the Horqin sandy land, China [J]. *Frontiers in Plant Science*, 2021, 12:655517.
- [3] 闫德仁.科尔沁沙地杨树防护林衰退原因探讨[J].内蒙古林业科技,2016,42(1):49-51.
- [4] 阿拉坦塔,张金旺,付贵生,等.科尔沁沙地不同造林密度对杨树人工林生长发育的影响[J].林业科技,2015,40(1):34-37.
- [5] 张佳,李生宇,靳正忠,等.防护林下草本植物层片物种多样性与环境因子的关系[J].干旱区研究,2011,28(1):118-125.
- [6] 雷虹.科尔沁沙地主要防护林碳氮磷化学计量特征[D].辽宁 阜新:辽宁工程技术大学,2019.
- [7] 邵元元,邹莉,王志英,等.落叶松人工林土壤养分与微生物群落的变化动态[J].东北林业大学学报,2011,39(1):83-84,98.
- [8] 贾希洋,周静静,宿婷婷,等.平茬密度对荒漠草原人工柠条林间生境的影响[J].生态学报,2020,40(12):4126-4136.
- [9] 杨晓娟,王海燕,刘玲,等.不同林龄长白落叶松人工林土壤肥力[J].东北林业大学学报,2013,41(3):51-56.
- [10] 杨小波,张桃林,等.海南琼北地区不同植被类型物种多样性与土壤肥力的关系[J].生态学报,2002,22(2):190-196.
- [11] Qiu Renhui, Chen Han, Zhuo Lixin. Effects of selection cutting on the forest structure and species diversity of evergreen broad-leaved forest in Northern Fujian, Southern China [J]. *Forestry Studies in China*, 2006, 8(1): 16-20.

- [12] 刘甲午,葛兆轩,田晓敏,等.华北落叶松各龄级土壤肥力的研究[J].安徽农业科学,2015(43):2156-158,161.
- [13] 董雪,虞毅,高永,等.天然沙冬青平茬复壮技术研究[J].科技导报,2014,32(23):55-61.
- [14] 吉小敏,宁虎森,梁继业,等.典型荒漠与绿洲过渡带人工梭梭林平茬复壮试验研究[J].中南林业科技大学学报,2016,36(12):37-43.
- [15] Xie Hongtao, Wang G G, Yu M. Ecosystem multifunctionality is highly related to the shelterbelt structure and plant species diversity in mixed shelterbelts of Eastern China [J]. *Global Ecology and Conservation*, 2018, 16: e00470.
- [16] Wu Yan, Wang Wenjie, Wang Qiong, et al. Impact of poplar shelterbelt plantations on surface soil properties in Northeastern China [J]. *Canadian Journal of Forest Research*, 2018, 48(5): 559-567.
- [17] Wang Feng, Pan Xubin, Gerlein-Safdi C, et al. Vegetation restoration in Northern China: A contrasted picture [J]. *Land Degradation & Development*, 2020, 31(6): 669-676.
- [18] 杨文斌,王晶莹,王晓江,等.科尔沁沙地杨树固沙林密度、配置与林分生长过程初步研究[J].北京林业大学学报,2005(4):33-38.
- [19] 赵文智,刘志民,常学礼.奈曼沙区植被土壤水分状况的研究[J].干旱区研究,1992,9(3):40-44.
- [20] Thiery J M, d'Herbès J M, Valentin C. A model simulating the genesis of banded vegetation patterns in Niger [J]. *Journal of Ecology*, 1995, 83: 497-507.
- [21] Galle S, Peugeot C. Soil Water Spatial Distribution of Tiger Bush in Niger [C] // AGU fall meeting, San Francisco. *Eos Trans*(74).1993, 43:C253.
- [22] 杨文斌,王涛,冯伟,等.低覆盖度治沙的理论及沙漠科
- 技进步[J].中国沙漠,2017,37(1):1-6.
- [23] 杨文斌,郭建英,胡小龙,等.低覆盖度行带式固沙林带间植被修复过程及其促进沙地逆转效果分析[J].中国沙漠,2012,32(5):1291-1295.
- [24] 姜丽娜.低覆盖度行带式固沙林促进带间土壤、植被修复效应的研究[D].内蒙古呼和浩特:内蒙古农业大学,2011.
- [25] 罗维成,赵文智,孙程鹏,等.科尔沁沙地樟子松(*Pinus sylvestris*)人工固沙林演变过程中物种多样性和土壤水分特征[J].中国沙漠,2018,38(1):126-132.
- [26] 乌达巴拉.科尔沁沙地土地利用变化分析及驱动力研究[D].内蒙古呼和浩特:内蒙古大学,2009.
- [27] 马克平,刘灿然,刘玉明.生物群落多样性的测度方法(II): β 多样性的测度方法[J].生物多样性,1995,3(1):38-43.
- [28] 马克平,刘玉明.生物群落多样性的测度方法(I): α 多样性的测度方法(下)[J].生物多样性,1994,2(4):231-239.
- [29] 白永飞,许志信,李德新.内蒙古高原针茅草原群落 α 多样性研究[J].生物多样性,2000,8(4):353-360.
- [30] 白永飞,邢雪荣,许志信,等.内蒙古高原针茅草原群落 β 多样性研究[J].应用生态学报,2000,11(3):408-412.
- [31] 姜丽娜,杨文斌,卢琦,等.低覆盖度行带式固沙林对土壤及植被的修复效应[J].生态学报,2013,33(10):3192-3204.
- [32] 陈乾,刘凯,王希贤,等.福建柏混交林主要土壤理化性质与土壤含水量的关联研究[J].福建农林大学学报(自然科学版),2021,50(6):771-780.
- [33] 石星,李卫,杨文斌,等.低覆盖度行带式固沙林对带间小气候的影响[J].干旱区资源与环境,2015,29(10):117-121.
- [34] 杨文斌,王涛,熊伟,等.低覆盖度治沙理论的核心水文原理概述[J].中国沙漠,2021,41(3):75-80.

(上接第 128 页)

- [36] 水利部水土保持监测中心.径流小区和小流域水土保持监测手册[M].北京:中国水利水电出版社,2015.
- [37] 李浩,韦本辉,黄金玲,等.粉垄对甘蔗根系结构发育及呼吸代谢相关酶活性的影响[J].中国农业科学,2021,54(3):522-532.
- [38] 梁珂,贺小容,何丙辉,等.翻耕除草对不同坡长下紫色土氮磷流失的影响[J].水土保持学报,2020,34(4):7-13.
- [39] Wu Lei, Yen Haw, Ma Xiaoyi. Effects of particulate fractions on critical slope and critical rainfall intensity for runoff phosphorus from bare loessial soil [J]. *Catena*, 2021, 196: 104935.
- [40] Gomes T F, Van de Broek M, Govers G, et al. Runoff, soil loss, and sources of particulate organic carbon delivered to streams by sugarcane and riparian areas: An isotopic approach [J]. *Catena*, 2019, 181: 104083.
- [41] 毛妍婷,刘宏斌,郭树芳,等.耕作措施对坡耕地红壤地表径流氮磷流失的影响[J].水土保持学报,2020,34(5):26-33.
- [42] 陈仕奇,龙翼,严冬春,等.三峡库区石盘丘小流域氮磷输出形态及流失通量[J].环境科学,2020,41(3):1276-1285.
- [43] 李宗勋,李启艳,侯晓龙,等.不同自然降雨等级下不同郁闭度马尾松林的水土流失特征[J].水土保持学报,2020,34(1):27-33,40.