

DOI: 10.5846/stxb201909051855

杨玉婷, 石玉林, 李战刚, 康华, 樊勇明, 郑诚, 温仲明. 陕北“三北”防护林下草本群落特征及其与林分结构和土壤养分的关系. 生态学报, 2020, 40(18): 6542-6551.

Yang Y T, Shi Y L, Li Z G, Kang H, Fan Y M, Zheng C, Wen Z M. Community characteristics of understory herb layer and its relationships with stand structure and soil nutrient availability in the Three-North shelterbelt of Shaanxi, China. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(18): 6542-6551.

陕北“三北”防护林下草本群落特征及其与林分结构和土壤养分的关系

杨玉婷¹, 石玉林², 李战刚², 康 华², 樊勇明¹, 郑 诚¹, 温仲明^{1,3,*}

1 西北农林科技大学草业与草原学院, 杨陵 712100

2 陕西省防护林建设工作站, 西安 710082

3 中国科学院教育部水土保持与生态环境研究中心, 杨陵 712100

摘要: 林下草本层是人工林生态系统的基础功能层, 对维护人工林生态系统的健康、稳定和功能具有重要意义。了解陕北“三北”防护林建设对林下草本群落特征的影响, 并解析林下草本群落发育与林分结构和土壤养分变化的响应关系, 对合理评估防护林建设工作和指导未来生态建设具有重要价值。为此, 调查了陕北典型风沙区和黄土区不同造林阶段防护林下草本地上生物量和物种多样性的变化, 并分析其与林分结构和土壤养分的关系。结果表明: (1) 风沙区不同造林阶段人工林下草本平均地上生物量 (23.64 g/m^2) 显著低于黄土区 (44.53 g/m^2)。随造林年限增加, 风沙区林下草本地上生物量和物种多样性逐渐升高, 而黄土区林下草本地上生物量和物种多样性则逐渐降低。(2) 风沙区人工林土壤有效氮和有机碳随造林年限的增加逐渐升高, 而黄土区人工林下土壤有效氮和有机碳则无明显变化趋势。(3) 风沙区早期林下草本地上生物量和物种多样性升高主要得益于土壤养分的提升。而黄土区早期林下草本生物量和物种多样性降低主要是人工林郁闭度增加所致。风沙区防护林的建设促进了林下草本的发育, 而黄土区早期人工林下草本出现退化现象。建议对风沙区进行防护林建设, 而黄土区以自然恢复为主。

关键词: 林下草本; 林分结构; 土壤理化性质; 生物量; 物种多样性

Community characteristics of understory herb layer and its relationships with stand structure and soil nutrient availability in the Three-North shelterbelt of Shaanxi, China

YANG Yuting¹, SHI Yulin², LI Zhangang², KANG Hua², FAN Yongming¹, ZHENG Cheng¹, WEN Zhongming^{1,3,*}

1 College of Grassland Agriculture, Northwest A&F University, Yangling 712100, China

2 Shaanxi Shelter-belt Construction Station, Xi'an 710082, China

3 Research Center of Soil and Water Conservation and Ecological Environment, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Education, Yangling 712100, China

Abstract: Understory herbs make up a basic functional layer of plantation ecosystems, and have great significance for their health, stability, and function. Aboveground biomass and species diversity of understory herbs in plantations of different ages and their relationships with stand structure and soil nutrient availability were compared and evaluated in representative sandy and loess hilly areas on the Loess Plateau, which is important for the rational assessment of future shelterbelts and

基金项目: 陕西省防护林建设工作站项目; 国家自然科学基金项目 (41671289)

收稿日期: 2019-09-05; 网络出版日期: 2020-07-12

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zmwen@ms.iswc.ac.cn

ecological restoration sites. The results showed that: (1) the understory herb average aboveground biomass in sandy area (23.64 g/m^2) was significantly lower than that of loess hilly areas (44.53 g/m^2). As the duration of afforestation efforts increased, the understory herb aboveground biomass and species diversity in the sandy areas increased consistently, while in loess hilly areas, they declined gradually. (2) Soil available nitrogen and organic carbon in sandy areas increased gradually as duration of afforestation efforts increased, while in the loess hilly areas, they showed no obvious trend. (3) The increase in understory herb aboveground biomass and species diversity of younger plantations in sandy areas was a direct benefit of improvements in soil nutrient levels. In contrast, the understory herb aboveground biomass and species diversity decline of young plantations in the loess hilly areas was mainly caused by increases in canopy density. The plantation restoration efforts in sandy areas promoted the development of understory herbs. However, the understory herb layers of young plantations in loess hilly areas were severely degraded. These findings imply that shelterbelt construction is necessary for sandy areas, while natural restoration is more suitable for loess hilly areas.

Key Words: understory herb; stand structure; soil physicochemical property; biomass; species diversity

林下草本层是人工林生态系统的基础功能层^[1],因其所需的生态位相对较小,对生态系统环境变化敏感,故常作为衡量人工林生态系统的健康状况、功能恢复和稳定性的关键指标^[2-8]。生产力和物种多样性是植物群落的两大基本特性^[9],生产力(生物量等)是衡量群落生态功能强弱最重要的指标,其变化能够反映群落结构及功能的变化^[10]。物种多样性是反映群落物种组成、动态演替等方面的重要指标^[11],植被恢复过程中物种多样性的变化反映了植被的恢复程度^[12]。林下植被生物量和物种多样性不仅受地形、土壤肥力等非生物因子的作用^[13-14],还受郁闭度、林分密度和林龄等生物因子的影响^[15-16]。杨振奇等^[17]研究表明不同立地条件下人工沙棘林下草本层 Shannon 指数不同,阴坡纯林>阳坡纯林>沟底纯林。人工林下草本物种多样性与土壤有效氮、土壤 pH、土壤含水量的关系密切^[18]。人工林林下植被物种丰富度随着林龄的增加会逐渐减少^[3,19],但也有相反的情况,苏永中等^[20]在科尔沁沙地对不同年龄的小叶锦鸡儿人工林进行植物多样性研究发现,随着林龄的增加林下草本物种多样性明显增大。在密度过大或过小的林分中,林内形成了偏阴生或偏阳生的极端环境空间,林下植物物种结构单一,所以晋西黄土区油松林内草本物种多样性指数和均匀度指数随油松林密度的增大均先增后减^[13]。林分郁闭度控制着林内光照资源,林下植被生物量与林分郁闭度关系紧密^[21]。

陕北黄土高原地区受地理环境和气候的影响,植被稀疏,水土流失严重,生态系统严重失调,是我国生态环境最脆弱的地区之一。榆林市三北防护林人工林的种植主要分为北部风沙区和南部黄土丘陵沟壑区,风沙区土壤以沙土为主,地表土层疏松^[22]。土壤持水能力低,养分固持能力弱,植物生长受到限制^[23]。黄土丘陵沟壑区土壤为黄绵土,水土流失严重,降雨主要集中在夏季^[24],土壤养分和持水能力明显优于风沙区。“三北”防护林建设项目于 20 世纪 70 年代末在陕北地区开始实施,目前该地区针对“三北”防护林开展的研究多侧重于宏观上对防护林建设的思考^[25]与建议^[26],很少涉及林分结构的发育与变化,对林下草本植物群落变化与林分结构和土壤理化性质关系更鲜有研究。不同环境条件下,人工林生态系统发育过程不一样。为此,本研究以风沙区和黄土区不同造林阶段的防护林为研究对象,了解陕北“三北”防护林建设对林下草本群落特征的影响,并解析林下草本群落发育与林分结构和土壤养分变化的响应关系,对合理评估防护林建设工作,指导未来生态建设具有重要价值^[27]。

1 材料与方法

1.1 研究区概况及样地选择

陕西省“三北”防护林工程建设期限为 1978—2020 年,造林总任务 319.89 万 hm^2 ,分 5 期工程实施:一期工程(1978—1985 年)、二期工程(1986—1995 年)、三期工程(1996—2000 年)、四期工程(2001—2010 年)和

五期工程(2011—2020 年)^[28]。本研究的风沙区以榆阳区为代表,黄土区以米脂县为代表。榆阳区位于陕西省榆林市中部(37°49′—38°58′N,108°58′—110°24′E),是典型的风沙区。该区属中温带半干旱大陆性季风气候,年平均降水量 368.9 mm,年平均气温 8.3℃,土壤类型为沙土。人工林以杨树(*Pterocarya stenoptera*)、樟子松(*Pinus sylvestris*)为主,林下草本常见种为克氏针茅(*Stipa grandis*)、阿尔泰狗娃花(*Heteropappus altaicus*)、赖草(*Leymus secalinus*)和狗尾草(*Setaria viridis*)等。米脂县位于陕西省榆林市中偏东(37°39′—38°5′N,109°49′—110°29′E),属于典型的黄土高原丘陵沟壑区,水土流失严重,属中温带半干旱性气候区,年平均降雨量 451.6 mm,年平均气温 8.5℃,土壤类型为黄土。人工林以油松(*Pinus tabulaeformis*)、侧柏(*Platycladus orientalis*)为主,林下草本常见种为达乌里胡枝子(*Lespedeza davurica*)、赖草、阿尔泰狗娃花等。

2018 年 7 月到 8 月,在风沙区和黄土区,采用典型抽样法^[29],通过实地踏查和询问当地林业局,选取立地条件相似的不同造林阶段具有代表性的典型人工林。风沙区人工林为一期杨树、三期樟子松、四期樟子松和五期樟子松,黄土区人工林为一期油松、三期混交林(油松和刺槐比例为 4:6)、四期侧柏和五期侧柏,每期选择 3 个样地,每个样地采用标准地调查法设置 3 个 10 m×10 m 的乔木样方,同时在所选的乔木样方中按照对角线设置 3 个 1 m×1 m 的草本样方,样地基本概况见表 1。

1.2 植被调查和土样采集

林分特征与林下植被结构是评价防护林结构与功能的重要指标。本文对乔木样方进行每木检尺,记录其胸径、树高、冠幅、密度、郁闭度等林分特征信息。对林下草本样方进行群落学调查,包括物种名、盖度、多度、高度等,样方调查结束后将样方内植物地上部分分种剪下并除去粘附的土壤后装袋,带回实验室内,置于烘箱中 105℃杀青 30 min,70℃烘 48 h 至恒量,称取干重。

土壤改良是判断植被恢复是否取得成效的重要内容。本文主要采用土壤容重、土壤有效氮和土壤有机碳,分别从土壤持水力和土壤养分等方面来判断“三北”防护林建设对土壤改良的影响。在 10 m×10 m 的乔木样方内按对角线随机布设 3 个点采用 0—20 cm 土层的土壤,装入土壤袋,风干过筛后进行土壤有效氮和有机碳的测定,用环刀取原状土用于测定土壤容重。有机碳测定采用重铬酸钾容量法(外加热法),有效氮采用碱解扩散法测定^[30],土壤容重采用环刀法测定^[31]。

表 1 风沙区和黄土区样地基本概况
Table 1 Basic conditions of the sample plots in sandy area and loess hilly area

期数 Periods	林龄 Stand age/a	风沙区 Sandy area				黄土区 Loess hilly area			
		树种 Tree species	海拔 Altitude/m	坡度 Slope/(°)	坡位 Slope position	树种 Tree species	海拔 Altitude/m	坡度 Slope/(°)	坡位 Slope position
一期 First period	34—41	杨树	1182	8.0	中	油松	1090	12.0	下
	34—41	杨树	1150	9.0	中	油松	1089	16.0	中
	34—41	杨树	1157	8.6	中	油松	1085	24.8	上
三期 Third period	19—23	樟子松	1151	9.1	中	混交林	1040	12.8	上
	19—23	樟子松	1269	8.1	上	混交林	1036	15.9	上
	19—23	樟子松	1272	9.7	中	混交林	1045	26.0	中
四期 Fourth period	9—18	樟子松	1216	7.9	中	侧柏	1035	18.5	下
	9—18	樟子松	1217	8.0	中	侧柏	1033	19.7	上
	9—18	樟子松	1218	10.0	中	侧柏	963.6	17.6	上
五期 Fifth period	8	樟子松	1173	8.3	上	侧柏	992	22.9	上
	8	樟子松	1280	7.5	中	侧柏	947	32.4	下
	8	樟子松	1161	10.2	中	侧柏	960	38.0	下

1.3 数据处理

林下草本物种多样性指数计算方法:

Margalef 丰富度指数(M): $M = (S-1)/\ln N$

Simpson 优势度指数(D): $D = 1 - \sum_{i=1}^S P_i^2$

Shannon-Wiener 物种多样性指数(H): $H = - \sum_{i=1}^S P_i \ln P_i$

Pielou 均匀度指数(J_{sw}): $J_{sw} = \frac{H}{\ln S}$

式中, P_i 为第*i*个物种的相对重要值, S 为物种数目, N 为所有物种的个体总数。

采用 SPSS 20.0 统计软件和 Excel 2010 对数据进行统计分析,用 SPSS 20.0 进行单因素方差分析,用 Duncan's multiple range test 检验风沙区和黄土区不同造林阶段林下草本群落特征、土壤养分和林分结构的显著性差异($P=0.05$)。通过最小显著差异法(LSD)对不同期人工林不同土层的土壤容重进行显著性检验($P=0.05$)。使用 Pearson 相关分析来揭示林下草本地地上生物量、物种多样性与林分结构和土壤养分的关系。采用 Sigmaplot 12.5 软件绘图。

2 结果与分析

2.1 不同期人工林林分因子

在风沙区,三期樟子松郁闭度显著高于其他期人工林($P<0.05$),一期杨树和四期樟子松郁闭度显著高于五期樟子松($P<0.05$)。一期杨树树高显著高于其他期人工林($P<0.05$),三期樟子松树高显著高于四期和五期樟子松($P<0.05$),一期杨树和三期樟子松冠幅显著高于四期和五期樟子松($P<0.05$)。不同期人工林林分密度之间没有显著性差异($P>0.05$)。在黄土区,一期油松郁闭度和树高显著高于其他期人工林($P<0.05$),三期混交林树高显著高于四期和五期侧柏($P<0.05$)。三期混交林冠幅显著高于其他期人工林($P<0.05$),一期油松冠幅显著高于四期和五期侧柏($P<0.05$)。一期油松、四期和五期侧柏的林分密度显著高于三期混交林($P<0.05$;表 2)。

表 2 风沙区和黄土区人工林样地林分结构

Table 2 Stand structure of the plantation plots in sandy area and loess hilly area

样点 Sites	期数 Periods	郁闭度 Canopy density/%	树高 Tree height/m	冠幅 Crown width/m	林分密度 Stand density/ (株/hm ²)
风沙区 Sandy area	一期杨树	33.17±3.35b	9.67±0.90a	3.12±0.26a	683.3±60.1a
	三期樟子松	59.00±0.71a	6.46±0.26b	3.16±0.87a	625.00±94.6a
	四期樟子松	27.50±0.50b	4.02±0.13c	2.07±0.38b	600.00±100.0a
	五期樟子松	18.71±0.42c	2.65±0.19c	1.30±0.16b	557.10±48.1a
黄土区 Loess hilly area	一期油松	79.11±1.62a	6.94±0.28a	2.23±0.13b	1822.22±159.67a
	三期混交林	62.83±1.85b	5.87±0.41b	3.44±0.12a	950.00±56.27b
	四期侧柏	56.44±4.80b	2.78±0.13c	1.74±0.07c	1633.33±139.44a
	五期侧柏	52.11±4.65b	2.62±0.06c	1.70±0.11c	1622.22±102.44a

不同字母代表同一地区不同期人工林之间存在显著差异($P<0.05$)

2.2 不同期人工林土壤养分

风沙区三期樟子松的土壤容重在 0—80 cm 显著低于其他期人工林($P<0.05$),一期杨树的土壤容重在 0—20 cm 显著低于四期和五期樟子松($P<0.05$)。除 20cm 外,黄土区一期油松土壤容重在 0—40 cm 显著高于其他期人工林($P<0.05$;图 1)。随着造林年限的增加,风沙区的土壤有效氮和土壤有机碳呈逐渐增加趋势,一期杨树林下土壤有效氮和土壤有机碳显著高于其他期人工林($P<0.05$)。在黄土区,三期混交林的土壤有效氮显著高于其他期人工林($P<0.05$),三期混交林的土壤有机碳显著高于一期油松和五期侧柏($P<0.05$;图 2)。

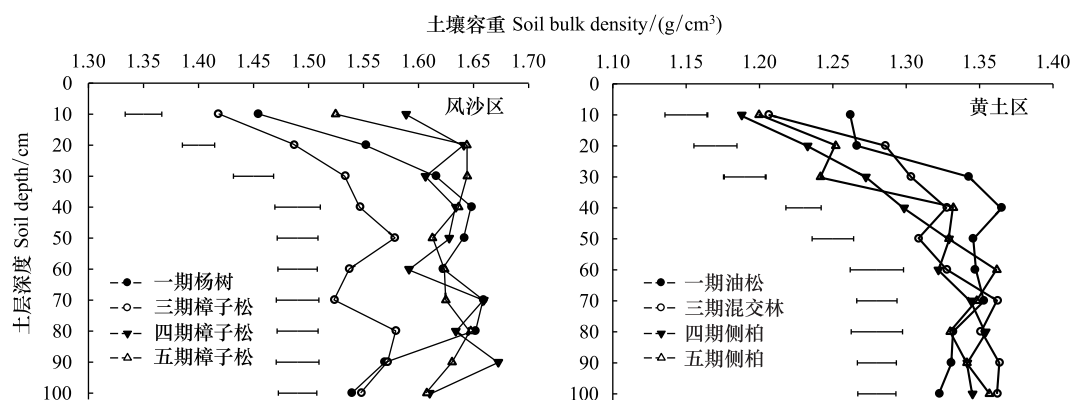


图1 风沙区和黄土区不同期人工林下土壤容重

Fig.1 Soil bulk density of different period plantations in sandy area and loess hilly area

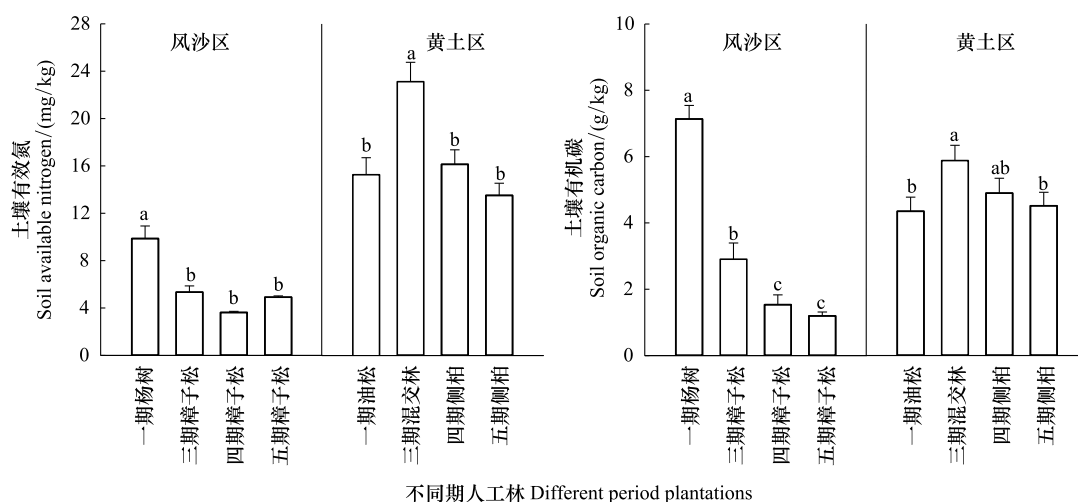


图2 风沙区和黄土区不同期人工林下土壤有效氮和土壤有机碳

Fig.2 Soil available nitrogen and soil organic carbon of different period plantations in sandy area and loess hilly area

不同字母代表同一地区不同期人工林之间存在显著差异 ($P < 0.05$)

2.3 不同期人工林下草本盖度和地上生物量

风沙区不同期人工林下草本平均地上生物量 (23.64 g/m^2) 显著低于黄土区 (44.53 g/m^2)。在风沙区, 一期杨树和三期樟子松林下草本盖度显著高于四期和五期樟子松 ($P < 0.05$), 三期樟子松林下草本地地上生物量显著高于四期和五期樟子松 ($P < 0.05$)。在黄土区, 一期油松林下草本盖度和地上生物量显著低于其他期人工林 ($P < 0.05$)。三期混交林和五期侧柏林下草本盖度和地上生物量生物量显著低于四期侧柏 ($P < 0.05$; 图 3)。

2.4 不同期人工林下草本物种多样性

在风沙区, 随着造林年限的增加林下草本的 Shannon-Wiener 多样性指数、Margalef 丰富度指数和 Simpson 优势度指数均呈逐渐增加的趋势, 一期杨树的 Shannon-Wiener 多样性指数和 Margalef 丰富度指数显著高于四期和五期樟子松 ($P < 0.05$)。一期杨树的 Simpson 优势度指数显著高于五期樟子松 ($P < 0.05$)。五期樟子松的 Pielou 均匀度指数显著低于其他期人工林 ($P < 0.05$)。在黄土区, 随着造林年限的增加林下草本的 Shannon-Wiener 多样性指数、Margalef 丰富度指数、Simpson 优势度指数和 Pielou 均匀度指数呈降低趋势, 一期油松的 Shannon-Wiener 多样性指数、Margalef 丰富度指数、Simpson 优势度指数和 Pielou 均匀度指数均显著低于其他

期人工林($P<0.05$;图 4)。

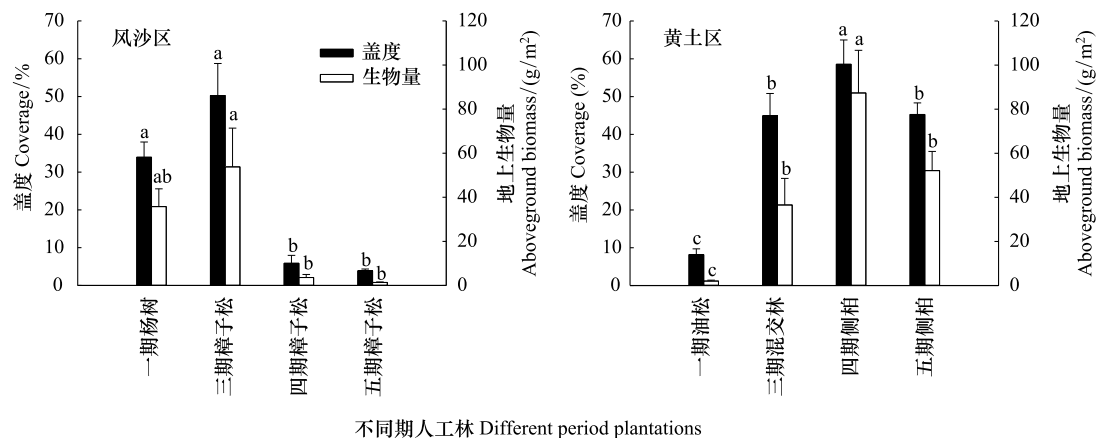


图 3 风沙区和黄土区不同期人工林下草本物种盖度和地上生物量

Fig.3 Understory herb coverage and aboveground biomass of different period plantations in sandy area and loess hilly area

不同字母代表同一地区不同期人工林之间存在显著差异 ($P<0.05$)

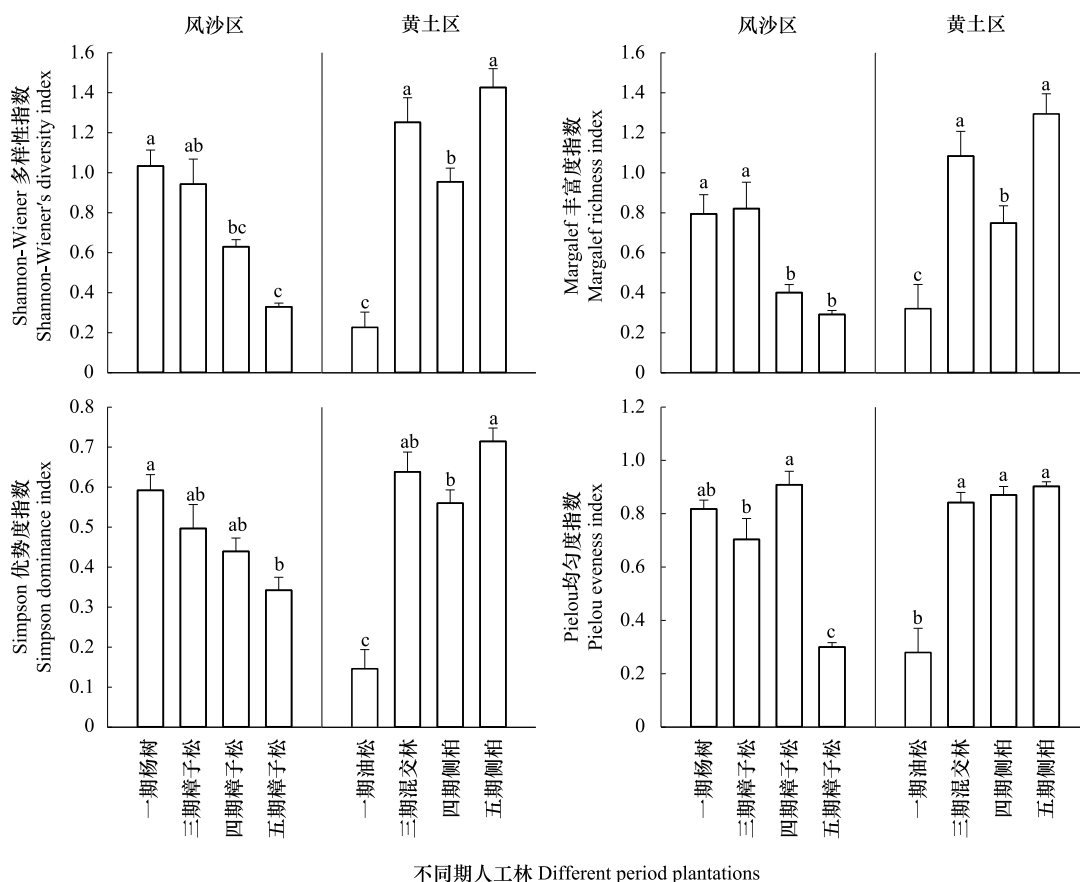


图 4 风沙区和黄土区不同期人工林下草本物种多样性

Fig.4 Understory herb species diversity index of different period plantations in sandy area and loess hilly area

不同字母代表同一地区不同期人工林之间存在显著差异 ($P<0.05$)

2.5 人工林林下草本生物量与林分结构和土壤养分的关系

风沙区林下草本地上生物量与人工林郁闭度和土壤有机碳呈显著正相关($r=0.445, P<0.05$; $r=0.512, P<0.05$), 与土壤有效氮呈极显著正相关($r=0.602; P<0.01$), 而与林分密度无显著相关性($P>0.05$)。黄土区林下草本地上生物量仅与人工林郁闭度呈极显著负相关($r=-0.461; P<0.01$), 而与林分密度、土壤有效氮和土壤有机碳均无显著相关性($P>0.05$; 图 5)。

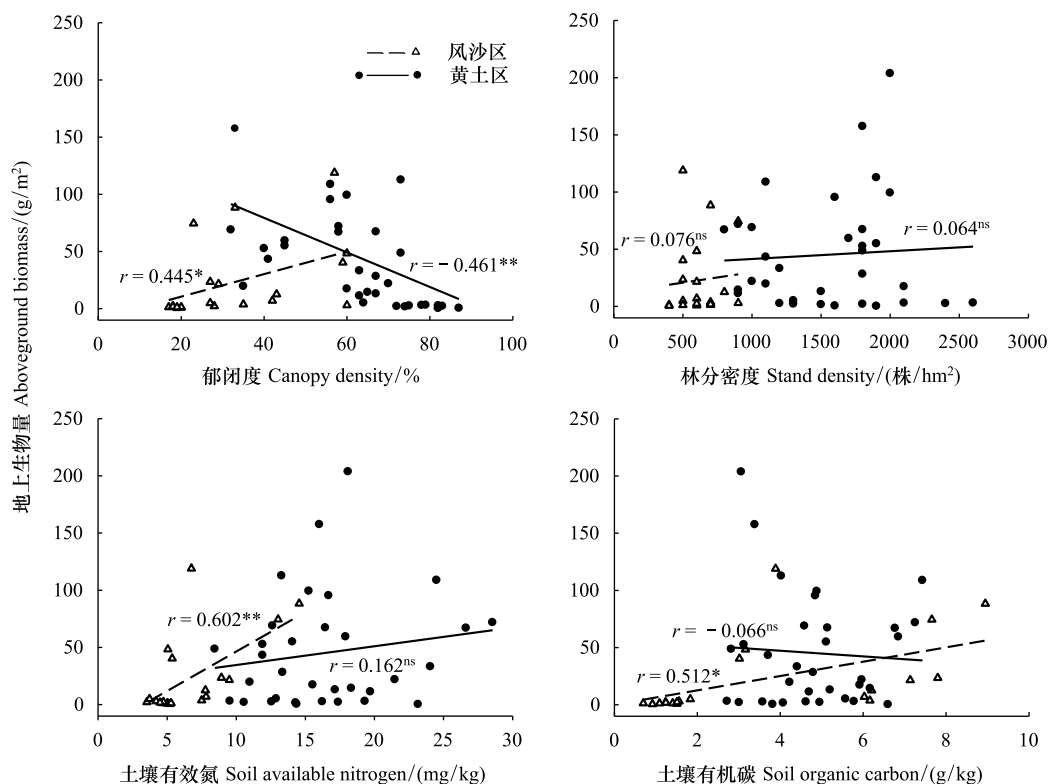


图 5 风沙区和黄土区林下草本地上生物量与土壤养分和林分结构的关系

Fig.5 Pearson's correlations between aboveground biomass of understory herb and soil nutrient, stand structure in sandy area and loess hilly area

显著性水平为 ns; $P>0.05$, *: $P<0.05$; **: $P<0.01$

2.6 人工林林下草本物种多样性与林分结构和土壤养分的关系

风沙区林下草本物种多样性指数与人工林郁闭度和土壤有效氮呈显著正相关($r=0.519, P<0.05$; $r=0.455, P<0.05$), 与土壤有机碳呈极显著正相关($r=0.627; P<0.01$), 与林分密度无显著相关性($P>0.05$); 黄土区林下草本物种多样性指数与人工林郁闭度呈极显著负相关($r=-0.671; P<0.01$), 与林分密度呈显著负相关($r=-0.352; P<0.05$), 与土壤有效氮和土壤有机碳不存在显著的相关性关系($P>0.05$; 图 6)。

3 结论与讨论

3.1 讨论

风沙区土壤养分低, 持水能力差。风沙区防护林建设通过改善土壤条件进而促进林下草本植被的生长发育。而黄土区自然条件下的土壤养分和水分条件本身可以满足草本植物群落的发育, 仅从生态防护角度, 即使是自然恢复也有可能发育成结构良好的植物群落。黄土区防护林建设反而不利于林下草本植被的生长发育。

草本植物是人工林生态系统的重要组成部分^[32], 人工林可通过影响林内光照资源和土壤条件影响林下

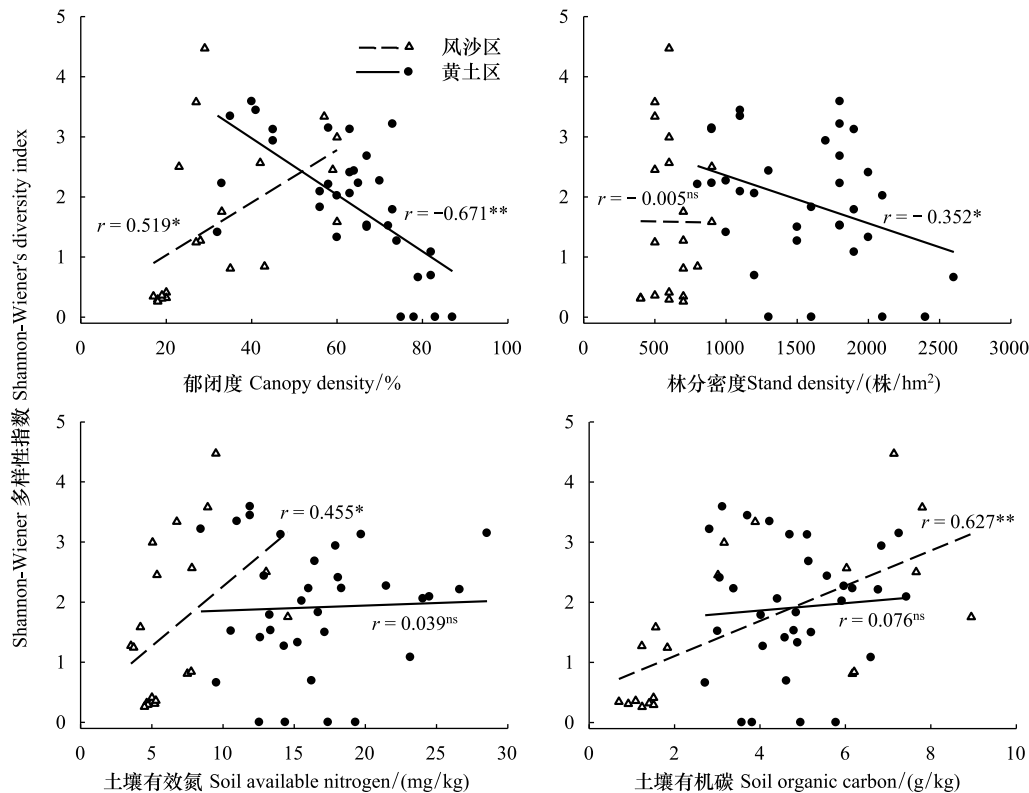


图6 风沙区和黄土区林下草本物种多样性与土壤养分和林分结构的关系

Fig.6 Pearson's correlations between Shannon-Wiener's diversity index of understory herb and soil nutrient, stand structure in sandy area and loess hilly area

显著性水平为 ns: $P > 0.05$, *: $P < 0.05$; **: $P < 0.01$

草本植被的生长与分布^[18]。本研究发现土壤有效氮和土壤有机碳是影响风沙区人工林下草本生物量和多样性的主要因子。这是由于风沙区土质属于沙土,造林时间较短的四期和五期樟子松林下土壤有效氮和有机碳较低,土壤持水能力差。只适合耐旱和耐贫瘠的草本植物生长,因此物种多样性和生物量均较低。而随着造林时间延长,植物与土壤之间的互作效果增强^[33],一期杨树和三期樟子松的土壤有效氮和有机碳显著增加,土壤容重降低。土壤的通气性和土壤肥力得到提高,为更多物种植被发育提供了良好的条件,进而引起人工林下草本生物量、多样性指数和丰富度指数的增加^[18,34]。一期杨树和三期樟子松的均匀度指数明显高于五期樟子松,这可能是因为造林后期,乔木层的生长已维持在一定水平,其林相、光照等环境因子相对比较稳定,对林下植物的生长和分布影响不大^[35]。但是一期杨树林下草本生物量相比于三期樟子松开始出现下降,这可能是因为一期杨树长期的蒸腾作用对土壤水分的严重消耗引起的。同时土壤水分的消耗使得杨树出现了部分退化死亡的现象,导致其郁闭度仅有 33%。三期樟子松的郁闭度也仅有 59%,因此郁闭度导致的林内光照资源的减少不足以引起林下草本生物量和物种多样性的降低。风沙区人工林林分密度与林下草本生物量和物种多样性无显著关系,这可能是风沙区不同期人工林之间林分密度无显著性差异,对林下草本的影响不显著,这与张勇强等^[19]的研究结果一致。

风沙区和黄土区人工林下草本地上生物量和多样性随着造林年限的变化存在着明显差异。研究发现黄土区不同期人工林下平均草本地上生物量显著高于风沙区,这可能与两地的年均降雨量和土壤条件差异有关。黄土区的年均降雨量(451.6 mm)明显高于风沙区(368.9 mm),且土壤养分和持水能力明显优于风沙区。黄土区自然条件下的土壤养分条件已经能够满足草本植物的生长需要。因此本研究发现黄土区林下草本的地上生物量和物种多样性与土壤有效氮和有机碳无显著相关性,仅与人工林郁闭度和林分密度呈显著负相

关。黄土区人工林郁闭度随着造林年限的延长显著增加,一期油松郁闭度达到 79.11%,高郁闭度引起的林内光照资源的严重下降和冠层降雨截留的增加与乔木长期较强的蒸腾作用引起的林下土壤水分的严重不足,造成不耐阴和不耐旱物种的逐渐消失^[5,36]。且油松枯枝落叶覆盖地表,长时间难以分解,只有少数草本生长,从而导致林下草本生物量和物种多样性显著下降^[37]。因此在造林过程中要定期进行疏伐、修理等措施,保持最佳的林分郁闭度,从而增加林下草本物种多样性^[38]。此外,林分密度可通过影响林分郁闭度和土壤水分条件影响林下植被的生长与分布^[39]。黄土区一期油松、四期和五期侧柏林分密度之间无显著性差异。三期混交林林分密度低于一期油松、四期和五期侧柏,但是由于三期混交林中刺槐的存在使得其平均冠幅显著增大,进而使得其郁闭度增加。导致三期混交林下草本的地上生物量和物种多样性出现降低。因此,在陕北“三北”防护林建设过程中,应该充分考虑风沙区和黄土区的土壤和气候条件,制定针对性的防护林建设策略。同时对造林年限较长的防护林进行人为管理,通过疏伐和修枝增加林分的通风透光程度,有助于林下草本植被的发育和演替,从而促进人工林生态系统功能的恢复。

3.2 结论

风沙区和黄土区人工林下草本地上生物量和多样性随着造林年限的变化存在着明显差异。随着造林年限的增加,风沙区林下草本生物量和物种多样性升高,黄土区林下草本生物量和物种多样性降低。风沙区早期林下草本生物量和物种多样性升高主要得益于土壤养分的提升。而黄土区早期林下草本生物量和物种多样性降低主要由人工林郁闭度增加所致。由于风沙区和黄土区环境条件的差异,林下植被发育过程和发育路径是不一样的。风沙区防护林的建设促进了林下草本的发育,使其近自然化,因此对风沙区,要构建合理的人工植被体系,必须有前期的人工干预,并通过一定阶段的物质积累,才能为林下植被的发育创造条件。而对于黄土区而言,防护林的建设不利于林下草本植被的生长发育,仅从生态防护角度看,即使是自然恢复也有可能发育成结构良好的植物群落。建议以自然恢复为主。

参考文献 (References):

- [1] 范玉龙, 胡楠, 丁圣彦, 翟元杰, 柳静, 廖秉华, 卢训令. 伏牛山自然保护区森林生态系统草本植物功能群的分类. 生态学报, 2008, 28(7): 3092-3101.
- [2] 高阳, 程积民, 赵钰, 苏纪帅. 黄土区典型人工林草本层生态恢复效应. 草地学报, 2013, 21(1): 79-86.
- [3] Small C J, McCarthy B C. Relationship of understory diversity to soil nitrogen, topographic variation, and stand age in an eastern oak forest, USA. *Forest Ecology and Management*, 2005, 217(2/3): 229-243.
- [4] 朱媛君, 杨晓晖, 时忠杰, 刘艳书, 张晓. 林分因子对张北杨树人工林林下草本层物种多样性的影响. 生态学杂志, 2018, 37(10): 2869-2879.
- [5] Mária Ligeti S, Tinya F, Bidló A, Ódor P. Environmental drivers of the composition and diversity of the herb layer in mixed temperate forests in Hungary. *Plant Ecology*, 2016, 217(5): 549-563.
- [6] Chudomelová M, Zelený D, Li C F. Contrasting patterns of fine-scale herb layer species composition in temperate forests. *Acta Oecologica*, 2017, 80: 24-31.
- [7] Cohen M J, Dabral S, Graham W D, Prenger J P, Debusk W F. Evaluating ecological condition using soil biogeochemical parameters and near infrared reflectance spectra. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2006, 116(1/3): 427-457.
- [8] 胡相明, 程积民, 万惠娥. 黄土丘陵区人工林下草本层植物的结构特征. 水土保持通报, 2006, 26(3): 41-45.
- [9] Ashton L A, Barlow H S, Nakamura A, Kitching R L. Diversity in tropical ecosystems: the species richness and turnover of moths in Malaysian rainforests. *Insect Conservation and Diversity*, 2015, 8(2): 132-142.
- [10] Bai Y F, Han X G, Wu J G, Chen Z Z, Li L H. Ecosystem stability and compensatory effects in the Inner Mongolia grassland. *Nature*, 2004, 431(7005): 181-184.
- [11] 王继丰, 韩大勇, 王建波, 付晓玲, 朱道光, 刘赢男, 曹宏杰, 黄庆阳, 谢立红, 钟海秀, 隋心, 倪红伟. 三江平原湿地小叶章群落沿土壤水分梯度物种组成及多样性变化. 生态学报, 2017, 37(10): 3515-3524.
- [12] 王永健, 陶建平, 张炜银, 臧润国, 王微, 李宗峰, 李媛. 茂县土地岭植被恢复过程中物种多样性动态特征. 生态学报, 2006, 26(4): 1028-1036.
- [13] 李民义, 张建军, 郭宝妮, 黄明, 茹豪. 晋西黄土区不同密度油松人工林林下植物多样性及水文效应. 生态学杂志, 2013, 32(5):

1083-1090.

- [14] Bell F W, Lamb E G, Sharma M, Hunt S, Anand M, Dacosta J, Newmaster S G. Relative influence of climate, soils, and disturbance on plant species richness in northern temperate and boreal forests. *Forest Ecology and Management*, 2016, 381: 93-105.
- [15] Laiho O, Pukkala T, Lähde E. Height increment of understorey Norway spruces under different tree canopies. *Forest Ecosystems*, 2014, 1(1): 4.
- [16] Ligot G, Balandier P, Courbaud B, Jonard M, Kneeshaw D, Claessens H. Managing understory light to maintain a mixture of species with different shade tolerance. *Forest Ecology and Management*, 2014, 327: 189-200.
- [17] 杨振奇, 秦富仓, 张晓娜, 李晓琴, 牛晓乐, 刘力川. 砒砂岩区不同立地类型人工沙棘林下草本物种多样性环境解释. *生态学报*, 2018, 38(14): 5132-5140.
- [18] 崔宁洁, 张丹桔, 刘洋, 张健, 欧江, 张捷, 邓超, 纪托未. 不同林龄马尾松人工林林下植物多样性与土壤理化性质. *生态学杂志*, 2014, 33(10): 2610-2617.
- [19] 张勇强, 李智超, 厚凌宇, 宋立国, 杨洪国, 孙启武. 林分密度对杉木人工林下物种多样性和土壤养分的影响. *土壤学报*, 2020, 57(1): 239-250.
- [20] 苏永中, 赵哈林, 张铜会, 李玉霖. 科尔沁沙地不同年代小叶锦鸡儿人工林植物群落特征及其土壤特性. *植物生态学报*, 2004, 28(1): 93-100.
- [21] 金艳强, 包维楷. 四川柏木人工林林下植被生物量与林分结构的关系. *生态学报*, 2014, 34(20): 5849-5859.
- [22] 李文斌, 李新平. 陕北风沙区不同植被覆盖下的土壤养分特征. *生态学报*, 2012, 32(22): 6991-6999.
- [23] 张凯, 陈丽茹, 徐慧敏, 李秧秧. 黄土高原水蚀风蚀交错带小流域植物群落特征的空间变异及其影响因素. *应用生态学报*, 2019, 30(8): 2521-2530.
- [24] 刘迪, 陈海, 史琴琴, 张行, 耿甜伟. 黄土丘陵沟壑区生态风险时空动态及其风险分区——以陕西省米脂县为例. *自然资源学报*, 2019, 34(9): 2012-2025.
- [25] 李建东. 关于“三北防护林体系建设工程”的思考. *草业科学*, 2014, 31(12): 2195-2197.
- [26] 龚维, 李俊, 何宇, 丁锋, 姚源, 张浩宇, 孙一荣. 发展林业碳汇推动三北防护林体系建设. *生态学杂志*, 2009, 28(9): 1691-1695.
- [27] 郑晓阳, 赵冲, 刘青青, 冯玉超, 朱晨曦, 王正宁, 刘博. 成熟杉木人工林林下草本层生态位特征. *生态学杂志*, 2018, 37(2): 332-338.
- [28] 康华, 吕复扬. 陕西省三北防护林体系建设成就、经验及展望. *陕西林业科技*, 2001, 1(1): 3-6.
- [29] 方精云, 王襄平, 沈泽昊, 唐志尧, 贺金生, 于丹, 江源, 王志恒, 郑成洋, 朱江玲, 郭兆迪. 植物群落清查的主要内容、方法和技术规范. *生物多样性*, 2009, 17(6): 533-548.
- [30] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法. 北京: 中国农业科技出版社, 1999.
- [31] 国家林业局. 森林土壤分析方法. 北京: 中国标准出版社, 2000.
- [32] Horvat V, Biurrun I, García-Mijangos I. Herb layer in silver fir-beech forests in the western Pyrenees: Does management affect species diversity? *Forest Ecology and Management*, 2017, 385: 87-96.
- [33] 王树梅, 庞元湘, 宋爱云, 曹帮华, 朱振波, 李业宇. 基于林龄的滨海盐碱地杨树刺槐混交林土壤理化性质及草本植物多样性动态. *生态学报*, 2018, 38(18): 6539-6548.
- [34] 姚俊宇, 齐锦秋, 张柳桦, 王媚臻, 李婷婷, 张潇月, 郝建峰. 人为干扰对碧峰峡山矾次生林群落物种多样性和土壤理化性质的影响. *生态学杂志*, 2018, 37(10): 2942-2950.
- [35] 崔宁洁, 陈小红, 刘洋, 张健, 杨万勤. 不同林龄马尾松人工林林下灌木和草本多样性. *生态学报*, 2014, 34(15): 4313-4323.
- [36] 叶柳欣, 库伟鹏, 刘军, 徐旻昱, 孟方荣, 傅伟军, 刘娟, 金锦, 吴家森. 封育年限对毛竹林群落结构和林下植物多样性影响. *生态学报*, 2020, 40(3), doi: 10.5846/stxb201809282120.
- [37] 张柳桦, 齐锦秋, 李婷婷, 鱼舜尧, 张潇月, 张荣, 郝建峰. 林分密度对新津文峰山马尾松人工林林下物种多样性和生物量的影响. *生态学报*, 2019, 39(15): 5709-5717.
- [38] 原志坚, 王孝安, 王丽娟, 韩兵兵, 李静. 抚育对黄土高原油松人工林林下植被功能多样性的影响. *生态学杂志*, 2018, 37(2): 339-346.
- [39] 周树平, 梁坤南, 杜健, 李碧均, 周再知, 黄桂华. 不同密度柚木人工林林下植被及土壤理化性质的研究. *植物研究*, 2017, 37(2): 200-210.