

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

罗维成^{1,2}, 赵文智¹, 孙程鹏^{1,2}, 闫加亮^{1,2}

(1. 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所 中国生态系统研究网络临泽内陆河流域研究站/中国科学院内陆河流域生态水文重点实验室, 甘肃 兰州 730000; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 人工固沙植被是干旱、半干旱区荒漠化防治的重要内容, 研究人工固沙植被演变过程中物种多样性和土壤水分变化特征对于人工固沙植被的经营与管理有重要意义。对科尔沁沙地营造的 5~45 a 的樟子松(*Pinus sylvestris*)人工固沙植被林下植被的物种多样性和土壤水分变化特征进行了研究。结果表明: 在樟子松固沙林演变过程中, 群落中禾本科和菊科植物种始终占主导地位, 且随着樟子松栽植年限的增加, 禾本科植物所占比例显著增加。物种总数和草本植物数量都随着栽植年限的增加显著降低, 呈显著的线性关系。而灌木数量和栽植年限呈抛物线形关系, 随着樟子松栽植年限的增加先增大后减小。草本植物盖度和地上生物量与樟子松栽植年限也呈抛物线形关系, 在栽植 25 a 后草本植物盖度达到最大值。樟子松人工固沙林演变过程对土壤含水量也有显著影响, 土壤平均含水量和樟子松栽植年限呈显著线性关系, 栽植 45 a 后, 土壤平均含水量由 3.5% 降至 1.4%。土壤水分的急剧下降是樟子松人工林演变后期面临的主要挑战。

关键词: 樟子松(*Pinus sylvestris*); 植物多样性; 物种组成; 土壤含水量

文章编号: 1000-694X(2018)01-0126-07

DOI: 10.7522/j.issn.1000-694X.2016.00151

中图分类号: Q948.12; S152.7

文献标志码: A

0 引言

人工林建设是干旱、半干旱区生态恢复和荒漠化防治的最有效途径之一^[1]。在中国半湿润及半干旱地区采用樟子松(*Pinus sylvestris*)进行造林固沙已有近 60 a 的历史^[2-3]。在辽宁章古台地区人工固沙造林实验成功后, 樟子松已经成为中国北方地区大面积分布的人工固沙造林树种^[4-5]。然而, 自 20 世纪 80 年代末开始, 樟子松人工固沙林开始出现枝叶变黄、长势减弱和病虫害等现象, 继而大片死亡和衰退^[6-7]。朱教君等^[5]认为樟子松人工固沙林在栽植初期和中期表现出适应性强、耐干旱瘠薄和生长速度快等特性, 但是栽植约 30 a 后开始出现生长减缓、林分提早衰弱等趋势, 表明栽植后期樟子松固沙林稳定性降低。而曾德慧等^[4]发现, 栽植 20 a 后, 部分樟子松林就已经出现了枯梢病和生长下降等现象, 特别是高生长缓慢, 甚至趋于停止, 个别林木濒于死亡, 此时樟子松林表现出一定的不稳定性。

导致樟子松人工固沙林衰退和稳定性降低的原

因有很多, 例如引种区气候差异过大、经营管理方法不当、土壤水分利用失衡和病虫害等^[8]。但是, 土壤水分含量下降被认为是樟子松人工固沙林衰退和稳定性降低的主要原因^[4,9], 而土壤水分含量降低的主要原因是人工林密度过大和降水量少^[4]。曾德慧等^[4]发现, 樟子松人工固沙林种植 15 a 后, 林分地下水位、土壤含水量和根栖层养分含量均显著降低, 导致樟子松在种植 20 a 后就开始衰退和死亡。而朱教君等^[9]发现, 科尔沁沙地流动沙丘在治理前土壤含水率约为 3.9%, 而种植樟子松人工固沙林 10 a 后, 土壤含水率下降至 3.5%, 28 a 以后下降至 2.5%, 而在樟子松人工固沙林栽植 25 a 后其根系几乎利用不到地下水, 这是科尔沁沙地樟子松衰退的主要原因。林下物种多样性及植被组成也是影响人工林稳定性的重要因素^[10-11]。例如, 在干旱热带森林生态系统中, 人工林稳定性随着物种多样性的增加而增大, 在人工林演变后期, 物种多样性下降, 稳定性也随之降低^[12-14]。

近年来, 虽然国内学者对科尔沁沙地樟子松人

收稿日期: 2016-06-30; 改回日期: 2016-11-18

资助项目: 国家重点基础研究发展计划项目(2013CB429903)

作者简介: 罗维成(1987—), 男, 甘肃靖远人, 博士研究生, 主要从事生态水文学研究。E-mail: luoweicheng@lzb.ac.cn

通信作者: 赵文智(E-mail: zhaowzh@lzb.ac.cn)

工林的群落结构和土壤水分动态^[3,15]、不同密度樟子松林生长状况^[16]、幼苗存活和光合生理特征等^[5]做了很多研究。但是,仅有个别研究关注了樟子松人工固沙林演变过程中的稳定性及其影响因素^[4],也未见对科尔沁沙地人工樟子松固沙林演变过程中物种多样性变化、物种组成特征和土壤水分变化等放面的研究。因此,我们以科尔沁沙地中南部不同栽植年限的樟子松人工固沙林为研究对象,研究了人工樟子松固沙林演变过程中物种多样性、物种组成和土壤水分变化特征。试图验证以下假设:(1)物种多样性和物种组成以及樟子松人工林演变时间之间有显著相关关系;(2)土壤水分含量随着樟子松人工固沙林的演变而降低,以期为科尔沁沙地荒漠化防治及人工林的管理提供数据支持和理论支撑。

1 研究区概况及研究方法

1.1 研究区概况

研究区位于科尔沁沙地中南部的奈曼旗境内。地理位置 42°41'N、120°55'E,平均海拔 360 m。属于典型的温带半干旱大陆性季风气候,年降水量约 365 mm,年蒸发量约 1 973 mm,降水多在 6—8 月。年均气温 6.4℃,≥10℃年积温 3 000℃以上,无霜期 150 d。流动和半流动、固定沙丘、丘间低地和甸子地相间分布。土壤主要为风沙土、草甸土、沙质栗钙土和沼泽土。主要植被有猪毛菜(*Salsola collina*)、狗尾草(*Setaria viridis*)、砂蓝刺头(*Echinops gmelinii*)、糙隐子草(*Cleistogenes squarrosa*)和小叶锦鸡儿(*Caragana microphylla*)等^[11,17]。

1.2 研究方法

查阅资料和走访当地居民后,在科尔沁沙地中南部的奈曼旗境内选择立地条件相似的栽植时间分别为 5、10、18、25、35、45 a 的樟子松人工固沙植被样地。在每个样地里随机选取 6 个 20 m×20 m 的样方,调查樟子松和灌木树种的种树、密度、株高和冠幅等参数。在每个样方内选取 6 个 1 m×1 m 的小样方,调查样方内草本植物种、密度、株高、冠幅、盖度和生物量等参数。植被盖度用目测法获得,植被株高和冠幅用折尺测定^[11];将小样方内所有草本植物地上部分剪下来,带回实验室 85℃下烘干 48 h 后计算草本植物生物量。用土钻法测量每个大样方内 0~200 cm 深的土壤含水量,0~100 cm 深度内每 10 cm 一层,100~200 cm 土壤深度内每 20 cm

一层,土壤样品在 105℃下烘干 24 h 测量土壤含水量,每个大样方 3 个重复;最后我们还用相同的方法测量了裸露流沙地土壤水分状况作为对照。调查时间为 2015 年 8—9 月。

1.3 数据分析

选用丰富度指数(*S*,物种总数)、Simpson 优势度指数(*D*)和 Shannon-Wiener 多样性指数(*H*)来研究樟子松人工固沙植被演变过程中群落的物种多样性变化特征^[18]。

$$D = 1 - \sum P_i^2 \tag{1}$$

$$H = - \sum P_i \ln P_i \tag{2}$$

式中: $P_i = N_i/N$; N_i 指样方中第 i 种物种的个体数,并且 $\sum N_i = N$ 。

采用 SPSS 18 分析软件的 One-way ANOVA 方法进行方差分析,用 LSD 方法($\alpha=0.05$)进行差异显著性分析,采用 Microsoft Excel 13.0 和 Origin Pro 8.0 进行数据计算处理和绘图。

2 结果

2.1 樟子松人工固沙植被演变过程中物种多样性和物种组成特征

在樟子松人工固沙植被演变过程中共出现植物种 46 种,其中草本植物 35 种,灌木、半灌木 9 种,乔木 2 种,分属 19 个科、42 个属。樟子松人工固沙植被的演变过程显著影响了群落内科、种和属的数目,随着樟子松栽植年限的增加而减小,栽植 45 a 后达到最小值(表 1)。在樟子松固沙植被演变过程中,

表 1 不同栽植年限樟子松人工固沙植被群落中植物科、属和种数目

Table 1 The numbers of plant families, genera, and species with increasing plantation age

栽植年限/a	科数	属数	种数
5	10.67±0.88 ^a	18.00±3.21 ^a	19.00±3.46 ^a
10	10.00±0.58 ^a	15.67±1.45 ^{ab}	17.00±1.15 ^{ab}
18	7.67±1.20 ^{ab}	14.33±1.20 ^{abc}	15.00±1.00 ^{bc}
25	8.33±0.88 ^{ab}	13.33±0.67 ^{abc}	13.67±0.88 ^{bc}
35	7.33±0.33 ^{ab}	9.67±0.88 ^{bc}	10.33±1.20 ^{bc}
45	5.33±0.33 ^b	7.67±0.67 ^c	8.00±0.58 ^c
均值	8.22±0.70	13.11±1.35	13.83±1.38

不同小写字母表示各列之间差异显著($P<0.05$)。

群落中豆科、禾本科、藜科和菊科植物种所占比例超过 60%(表 2)。随着樟子松人工固沙植被的演变,禾本科植物所占比例显著增加,其他植物种没有变化(表 2)。

表 2 不同栽植年限樟子松人工固沙植被群落中豆科、禾本科、藜科和菊科植物数量及其所占比例

Table 2 The numbers and proportions of plants in leguminosae, gramineae, chenopodiaceae and compositae with increasing plantation age									
栽植年限/a	豆科		禾本科		藜科		菊科		
	物种数	比例/%	物种数	比例/%	物种数	比例/%	物种数	比例/%	
5	1.33±0.33 ^a	8.22±3.60 ^a	4.33±0.88 ^a	22.71±0.87 ^{ab}	2.00±1.00 ^a	9.26±4.76 ^a	3.33±0.67 ^a	17.48±1.80 ^a	
10	2.33±0.67 ^b	13.37±3.39 ^b	3.33±0.33 ^b	19.57±1.01 ^a	2.33±0.33 ^a	13.63±1.17 ^b	3.00±0.58 ^a	18.07±4.45 ^a	
18	2.33±0.33 ^b	15.54±1.81 ^{bc}	3.67±0.33 ^b	24.36±0.64 ^{abc}	2.67±0.33 ^a	18.11±3.07 ^c	2.67±0.33 ^a	18.11±3.07 ^a	
25	2.33±0.33 ^b	17.54±3.74 ^c	4.33±0.33 ^a	31.75±1.59 ^c	1.00±0.58 ^b	6.98±4.13 ^a	1.33±0.33 ^b	9.76±2.31 ^b	
35	1.00±0.00 ^a	9.97±1.28 ^a	3.00±0.58 ^b	28.54±2.49 ^{bc}	1.00±0.00 ^b	9.97±1.28 ^a	2.00±0.58 ^b	18.56±3.61 ^a	
45	0.67±0.33 ^c	7.87±3.96 ^a	3.33±0.33 ^b	41.60±2.10 ^d	0.67±0.33 ^b	8.47±4.33 ^a	1.33±0.33 ^b	16.80±4.20 ^a	
均值	1.67±0.33	12.09±2.96	3.67±0.47	28.09±1.45	1.61±0.43	11.07±3.12	2.28±0.47	16.46±3.24	

不同小写字母表示各列之间差异显著($P<0.05$)。

樟子松人工固沙植被演变过程显著影响了群落中多年生草本、半灌木、灌木和总物种数量(表 2),但是对它们占总物种数的比例没有影响(表 3、4,图 1)。物种总数和草本植物数量都随着栽植年限的增加显著降低,呈显著的线性关系(图 2)。而灌木数量和栽植年限呈抛物线形关系,在栽植初期随着栽植年限的增加灌木数量增加,在栽植 18 a 后达到最大值,随后降低(图 2)。

在樟子松人工固沙植被演变过程中,樟子松栽植年限与物种多样性指数(H)和优势度指数(D)都呈显著的抛物线形关系(图 3)。物种多样性指数和优势度指数都在栽植 5 a 后达到最大值,随后随着栽植年限的增加显著降低(图 3)。这些结论支持了我们的第一个假设。

表 3 樟子松人工固沙植被栽植年限对不同物种数量的影响方差分析表

Table 3 ANOVA analysis for effect of plantation age on numbers of different species										
df	一年生草本		多年生草本		半灌木		灌木		物种总数	
	F	P	F	P	F	P	F	P	F	P
5	2.54	0.086	4.31	0.018	5.2	0.009	3.15	0.048	7.8	0.001

表 4 樟子松人工固沙植被栽植年限对不同物种占物种总数比例的影响方差分析表

Table 4 ANOVA analysis for effect of plantation age on proportion of different species									
df	一年生草本		多年生草本		半灌木		灌木		
	F	P	F	P	F	P	F	P	
5	2.70	0.074	2.57	0.08	2.21	0.12	2.33	0.11	

2.2 樟子松人工固沙植被演变过程中植物盖度和生物量特征

樟子松人工固沙植被演变过程显著影响了群落

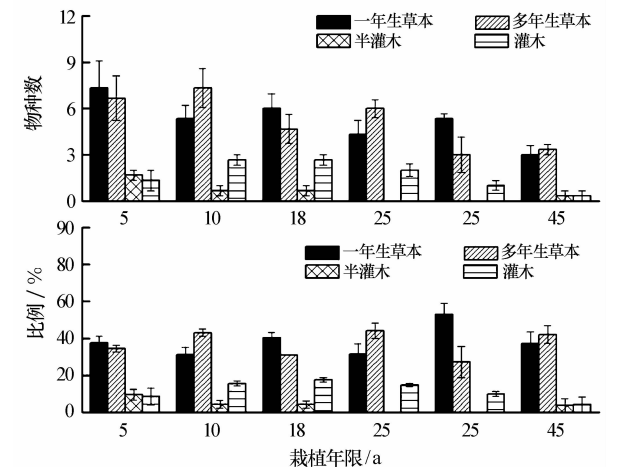


图 1 不同栽植年限樟子松人工固沙植被物种组成及比例
Fig.1 Changes of species number and proportion with plantation age

中草本植物的生物量(图 4)。在樟子松栽植 25 a 后草本生物量达到最大值,栽植 45 a 后达到最小值。草本植物生物量和樟子松栽植年限呈抛物线形关系,但是不显著(图 4)。

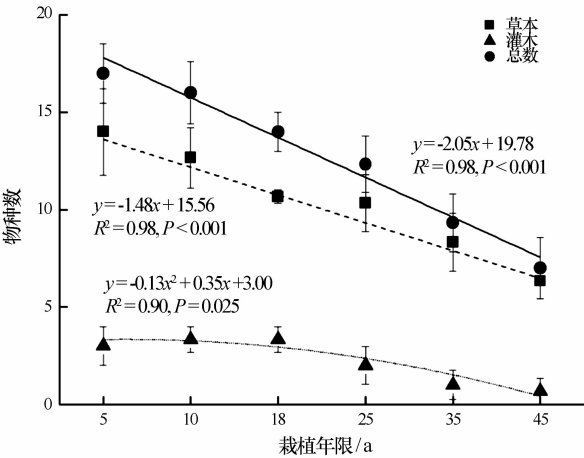


图 2 植物数量随着栽植年限的变化

Fig. 2 The changes in species number as functions of plantation age

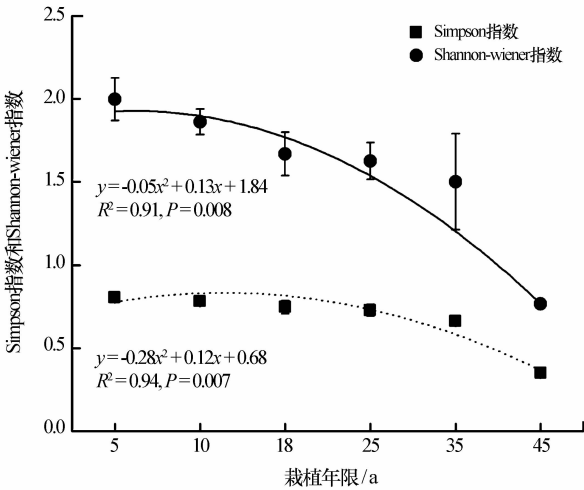


图 3 Simpson 和 Shannon-wiener 指数随着栽植年限的变化趋势

Fig. 3 The changes in Simpson and Shannon-wiener index as functions of plantation age

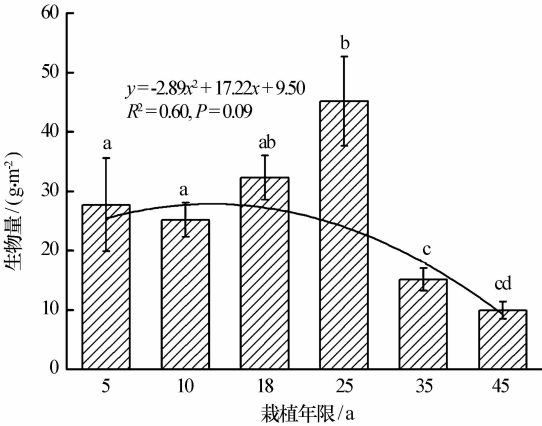


图 4 草本植物生物量随栽植年限的变化趋势

Fig. 4 The changes in aboveground biomass as a function of plantation age

樟子松人工固沙植被演变过程对群落灌木和乔木盖度有显著影响,且灌木和乔木盖度和樟子松栽植年限呈显著的抛物线形关系,灌木和乔木盖度随着樟子松栽植年限的增加显著增加(图 5)。草本植物盖度和樟子松栽植年限也成抛物线形关系,在栽植 25 a 后草本植物盖度达到最大值(图 5),此时草本植物生物量也达到最大值(图 4)。

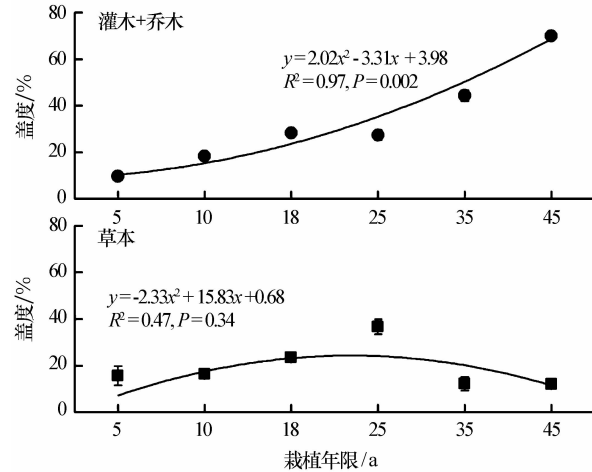


图 5 不同植物盖度随栽植年限增加的变化

Fig. 5 The changes in vegetation cover as a function of plantation age

2.3 樟子松人工固沙植被演变过程中土壤含水量变化特征

樟子松人工固沙植被演变过程对土壤含水量也有显著影响,樟子松栽植年限和 0~200 cm 深土层的平均土壤含水量呈显著的线性关系,土壤平均含水量随着樟子松栽植年限的增加显著减小,均低于流动沙丘土壤平均含水量(图 6)。樟子松人工固沙

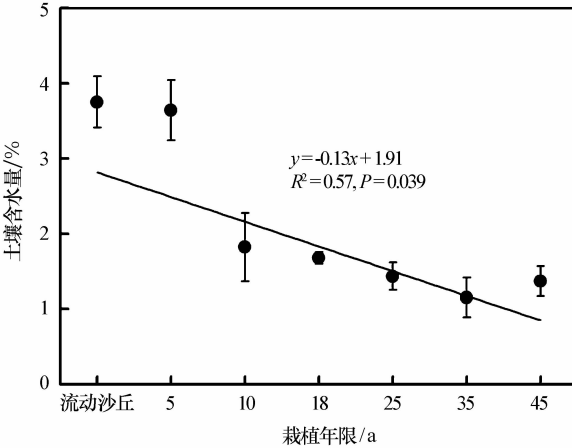


图 6 不同栽植年限 0~200 cm 深平均土壤含水量变化

Fig. 6 The changes in average soil water content as a function of plantation age

植被对土壤深层(100~200 cm)含水量影响显著,樟子松栽植初期的土壤含水量显著高于栽植后期。随着樟子松栽植年限的增加,深层土壤含水量显著降低(图 7)。这一结论支持了我们的第二个假设。

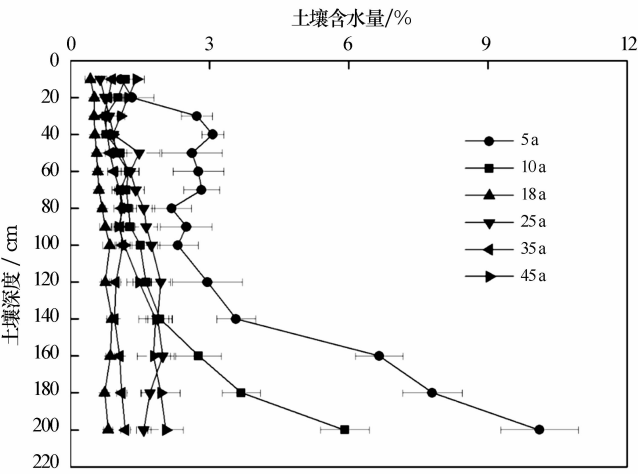


图 7 不同栽植年限 0~200 cm 深土壤含水量变化

Fig. 7 The changes of soil water content with plantation age

3 讨论

3.1 樟子松人工固沙林演变过程中物种多样性和物种组成变化特征

提高人工林稳定性是干旱、半干旱草原带人工林成功建设的关键^[4]。气候特征、管理方式和病虫害等因素都会影响人工林的稳定性^[8]。物种多样性和组成特征是反映人工林稳定性的重要指标^[11,17-19]。物种多样性和组成特征和沙地植物群落发育水平显著相关^[10],且物种多样性和植被组成对人工林土壤和水文特性也有显著影响,从而对人工林稳定性产生重要影响^[13,20],而这种影响因人工林树种和生境差异而异^[12,21-22]。我们的研究结果显示,在樟子松人工固沙林演变过程中,林下物种多样性随着樟子松栽植年限的增加显著降低;林下草本植物丰富度也随着樟子松人工林栽植年限的增加而显著降低,灌木丰富度先增大后降低。主要原因有两点:一是在樟子松人工林演变过程中,随着栽植年限的增加,林分郁闭导致林下一些喜阳植物因缺少太阳光照而死亡,最终导致林下物种多样性降低^[23-24];二是随着樟子松栽植年限的增加,其根系越来越发达,所吸收的土壤水分也随之增加,这就导致部分林下植被因吸收不到足够的土壤水分而死亡,最终导致林下物种多样性的降低^[25-26]。另外,不同栽植年限的人工林土壤微生物特性及土壤理化

性质的差异性也是导致其林下草本植物物种多样性差异的重要因素^[27-28]。

但是,Liu 等^[14]和李淑君等^[29]对荒漠草原带柠条(*Caragana korshinskii*)人工固沙林演变过程中物种多样性的研究结果不同,他们发现柠条人工林栽植前期物种多样性和丰富度是增加的,在栽植后期慢慢降低。主要原因是在柠条栽植初期,植被覆盖度增加,养分积累增加,从而导致植物种数增加;但是,栽植后期,柠条对土壤水分和养分等资源的过度吸收和消耗,又会导致植物种数下降^[29]。在本研究中,在樟子松栽植初期,为了保证樟子松正常存活通常会进行人为浇水灌溉,从而导致土壤含水量的增加,植物种数也随之增加^[30]。相反,在樟子松栽植后期,由于土壤水分含量下降以及樟子松冠幅的遮阴作用,导致林下草本植物数量显著降低,林分稳定性下降。

3.2 樟子松人工固沙林演变过程中林下植物盖度和生物量变化特征

林下植物生物量和盖度是反映群落稳定性和演变特征的重要指标^[14,29,31]。林下植被的生长状况还和林地土壤水分状况有直接关系^[32]。我们的结果表明,随着樟子松人工林栽植年限的增加,林下草本植物地上生物量和盖度都是先增大后减小;而灌木和乔木盖度呈增加趋势。这与 Liu 等^[14]的部分研究结果一致。他们发现,人工柠条林栽植年限显著影响林下草本植物地上生物量和盖度,草本植物生物量随着栽植年限的增加先增加后减小;而草本植物盖度随着栽植年限的增加先降低后增加。主要原因是,随着柠条种植年限的增加,柠条对土壤水分和养分吸收能力的增加导致草本植物生物量和盖度降低,而栽植一定年限柠条平茬后,柠条对水分和养分的吸收能力降低,草本植物盖度随之增加^[14,29]。在本研究中,樟子松栽植初期,由于浇水灌溉,林下土壤水分增加,草本植物生物量和高度增加;而栽植后期,随着樟子松对水分利用量的增加以及盖度的增加,导致草本植物数量减少,生物量和盖度降低。另外,随着樟子松的生长,其根系主要分布在 100 cm 深的土层,而吸收根主要分布在土壤表层 0~50 cm,这也在一定程度上限制了林下草本植物的生长^[33],导致草本植物生物量和盖度下降。

3.3 樟子松人工固沙林演变过程中土壤水分变化特征

水分条件是限制干旱、半干旱区人工林存活的

最主要因素^[34]。人工林的演变对土壤含水量有重要影响。郭忠升等^[35]研究了人工柠条林土壤水分的变化,结果表明随着栽植年限的增加,柠条林地土壤含水量和储水量都大幅下降。我们的研究也得出类似的结论:樟子松人工林土壤水分含量随着栽植年限的增加而显著降低。主要原因是随着栽植年限的增加,樟子松林蒸腾作用加强^[34,36],且随着樟子松冠幅的增大,林冠截留作用加强,导致补充到林内土壤的降水显著减少^[35],最终导致樟子松林内土壤含水量的急剧下降,林分稳定性也随之降低。

从樟子松种植初期(5 a)到中期(18 a),樟子松林内 0~200 cm 深土壤含水量急剧下降;从中期到后期(45 a)下降幅度较小。主要原因是樟子松的高速生长期在 4~15 a^[37],因此这段时间樟子松耗水量最大,土壤含水量下降较为明显;而后期生长速率下降,因此土壤水分下降幅度较小^[30]。由于樟子松人工林栽植年限的增加而导致的土壤含水量急剧下降也是导致樟子松林演变后期林窗面积增大,出现自疏现象的主要原因(未发表数据)。

4 结论

在科尔沁沙地樟子松人工固沙林演变过程中,群落物种多样性、物种组成和土壤水分状况都显著变化。在樟子松固沙林演变过程中,群落中禾本科和菊科植物种始终占据主导地位;随着樟子松栽植年限的增加,禾本科植物所占比例显著增加。林下物种总数和草本植物数量都随着栽植年限的增加显著降低,呈显著的线性关系。而灌木数量和栽植年限呈抛物线形关系,随着樟子松栽植年限的增加先增大后减小。草本植物盖度和地上生物量与樟子松栽植年限也呈抛物线形关系,在栽植 25 a 后草本植物盖度达到最大值。樟子松人工固沙林演变过程中,土壤平均含水量随着樟子松栽植年限的增加显著减小,呈显著线性关系。土壤水分的急剧下降是樟子松人工林演变后期面临的主要挑战。

致谢:感谢中国科学院奈曼沙漠化研究站各位老师的大力支持与帮助。

参考文献:

[1] 李新荣,张景光,刘立超,等. 腾格里沙漠沙坡头地区固沙植被对生物多样性恢复的长期影响[J]. 中国沙漠,2005,25(2): 173—181.

[2] 焦树仁. 干旱对章古台沙地樟子松人工林生长的影响[J]. 林业科学,1986,22(4):419—425.

[3] 赵文智. 奈曼沙区樟子松生长状况与水分关系[J]. 中国沙漠, 1992,12(1):64—70.

[4] 曾德慧,姜凤岐,范志平,等. 樟子松人工固沙林稳定性的研究[J]. 应用生态学报,1996,7(4):337—343.

[5] 朱教君,康宏樟,李智辉,等. 水分胁迫对不同年龄沙地樟子松幼苗存活与光合特性影响[J]. 生态学报,2005,25(10):2527—2533.

[6] Zhu J J, Fan Z P, Zeng D H, et al. Comparison of stand structure and growth between plantation and natural forests of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* on sandy land[J]. Journal of Forestry Research, 2003,14: 103—111.

[7] 朱教君,曾德慧,康红章,等. 沙地樟子松人工林衰退机制[M]. 北京:中国林业出版社,2005.

[8] 吴祥云,姜凤岐,李晓丹,等. 樟子松人工固沙林衰退的规律和原因[J]. 应用生态学报,2004,15(12):2225—2228.

[9] 朱教君,康宏樟,宋立宁,等. 科尔沁沙地南缘樟子松人工林地下水埋深季节变化[J]. 生态学杂志,2009,28(9):1767—1772.

[10] 张继义,赵哈林,张铜会,等. 科尔沁沙地植被恢复系列上群落演替与物种多样性的恢复动态[J]. 植物生态学报,2004,28(1):86—92.

[11] 左小安,赵哈林,赵学勇,等. 科尔沁沙地不同恢复年限退化植被的物种多样性[J]. 草业学报,2009,18(4):9—16.

[12] Kalacska M, Sanchez-Azofeifa G A, Calvo-Alvarado J C, et al. Species composition, similarity and diversity in three successional stages of a seasonally dry tropical forest[J]. Forest Ecology & Management, 2004,200(1/2/3):227—247.

[13] Suganuma M S, Assis G B D, Durigan G. Changes in plant species composition and functional traits along the successional trajectory of a restored patch of Atlantic Forest[J]. Community Ecology, 2014,151(1):27—36.

[14] Liu B, Zhao W, Liu Z, et al. Changes in species diversity, aboveground biomass, and vegetation cover along an afforestation successional gradient in a semiarid desert steppe of China[J]. Ecological Engineering, 2015,81:301—311.

[15] 方杰,魏雅芬,刘帅,等. 科尔沁沙地丘间低地樟子松人工林水分利用来源的稳定同位素解析[J]. 生态学杂志,2011,30(9): 1894—1900.

[16] 移小勇,赵哈林,崔建垣,等. 科尔沁沙地不同密度(小面积)樟子松人工林生长状况[J]. 生态学报,2006,26(4):1200—1206.

[17] 赵哈林,赵学勇,张铜会. 我国北方农牧交错带沙漠化的成因、过程和防治对策[J]. 中国沙漠,2000,20(增刊1):22—28.

[18] 张金屯. 植被数量生态学方法[M]. 北京:中国科学技术出版社,1995.

[19] 侯扶江,南志标,肖金玉,等. 重牧退化草地的植被、土壤及其耦合特征[J]. 应用生态学报,2002,13(8):915—922.

[20] Jules M J, Sawyer J O, Jules E S. Assessing the relationships between stand development and understory vegetation using a 420-year chronosequence[J]. Forest Ecology & Management, 2008,255(7):2384—2393.

[21] Hunt S L, Gordon A M, Morris D M, et al. Understory vegeta-

- tion in northern Ontario jack pine and black spruce plantations; 20-year successional changes[J]. Canadian Journal of Forest Research, 2011, 33(9): 1791—1803.
- [22] Souza A F, Pizo M A, Crossetti L O, et al. Afforestation effects on vegetation structure and diversity of grasslands in southern Brazil: the first years[J]. Journal for Nature Conservation, 2013, 21(1): 56—62.
- [23] 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[J]. 水土保持通报, 2006, 26(3): 41—45.
- [24] 高艳鹏, 赵廷宁, 骆汉. 晋西黄土丘陵沟壑区人工林下草本植物生物多样性研究[J]. 水土保持通报, 2011, 31(1): 103—108.
- [25] 张继义, 赵哈林, 崔建垣, 等. 科尔沁沙地樟子松人工林土壤水分动态的研究[J]. 林业科学, 2005, 41(3): 1—6.
- [26] 魏雅芬, 方杰, 赵学勇, 等. 科尔沁沙地樟子松人工林不同年龄针叶生理生态性状[J]. 植物生态学报, 2011, 35(12): 1271—1280.
- [27] 杨凯, 朱教君, 张金鑫, 等. 不同林龄落叶松人工林土壤微生物量碳氮的季节变化[J]. 生态学报, 2009, 29(10): 5500—5507.
- [28] 牛小云, 孙晓梅, 陈东升, 等. 辽东山区不同林龄日本落叶松人工林土壤微生物、养分及酶活性[J]. 应用生态学报, 2015, 26(9): 2663—2672.
- [29] 李淑君, 李国旗, 王磊, 等. 荒漠草原区不同林龄柠条林物种多样性研究[J]. 干旱区资源与环境, 2014, 28(6): 82—87.
- [30] 格日勒, 斯琴毕力格, 金荣. 毛乌素沙地引种樟子松生长特性的研究[J]. 干旱区资源与环境, 2004, 18(5): 159—162.
- [31] 陈民生, 赵京岚, 刘杰, 等. 人工林林下植被研究进展[J]. 山东农业大学学报: 自然科学版, 2008, 39(2): 321—325.
- [32] Li X R, Tan H J, He M Z, et al. Patterns of shrub species richness and abundance in relation to environmental factors on the Alxa Plateau: prerequisites for conserving shrub diversity in extreme arid desert regions[J]. Science in China, 2009, 52(5): 669—680.
- [33] 苏芳莉, 刘明国, 郭成久, 等. 沙地樟子松根系垂直分布特征及对土壤的影响[J]. 中国水土保持, 2006(1): 20—22.
- [34] 牛丽, 岳广阳, 赵哈林, 等. 利用液流法估算樟子松和小叶锦鸡儿人工林蒸腾耗水[J]. 北京林业大学学报, 2008(6): 1—8.
- [35] 郭忠升, 邵明安. 黄土丘陵半干旱区柠条锦鸡儿人工林对土壤水分的影响[J]. 林业科学, 2010, 46(12): 1—7.
- [36] 焦树仁. 樟子松人工林蒸腾耗水量的初步研究[J]. 生态学杂志, 1984, 3(6): 15—18.
- [37] 刘芳, 章尧想, 马迎宾, 等. 乌兰布和沙漠绿洲樟子松(*Pinus sylvestris* var. *mongolica*)生长规律初探[J]. 中国沙漠, 2015, 35(5): 1234—1238.

Changes in Species Composition, Diversity and Soil Water Content of *Pinus sylvestris* Artificial Sand-fixation Forest along An Afforestation Successional Gradient in Horqin

Luo Weicheng^{1,2}, Zhao Wenzhi¹, Sun Chengpeng^{1,2}, Yan Jialiang^{1,2}

(1. Linze Inland River Basin Research Station/Key Laboratory of Inland River Ecohydrology, Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000; 2. University of China Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Afforestation is a key technique for control of desertification in arid and semi-arid regions. Therefore, study the characteristics of species composition, diversity and soil water content of artificial sand-fixation forest during its successive process is important for the management of artificial vegetation. In this paper, we studied characteristics of species composition, diversity and soil water content of *Pinus sylvestris* artificial sand-fixation forest along an afforestation successional gradient from 5—45 years in Horchin. Our results show that the community was dominated by species in the Poaceae and Compositae during the successive process, and the number of species in the Compositae was significant increased with the increase of plantation age. The number of total species and herbs were decreased with the increase of plantation age followed a linear functions. However, the relationship between the number of shrubs and plantation age can well described with parabola functions. The biomass and coverage of herbs were first increased and then decreased with the increase of plantation age, and reached their maximum when the plantation age was 25 years. Soil water content was significant decreased with the increase of plantation age. And the average soil water content was decreased from 3.5% to 1.4% after 45 years. The shapely decline of soil water moisture is the mainly challenge of *P. sylvestris* in the later successive process.

Key words: *Pinus sylvestris*; species diversity; species composition; soil water content