

东北林业大学

硕士学位论文

科尔沁沙地防风固沙林稳定性研究

姓名：杨东华

申请学位级别：硕士

专业：水土保持与荒漠化防治

指导教师：赵雨森

201006

摘要

科尔沁沙地是我国主要沙地之一,由于水土流失和荒漠化的持续扩展,生态环境进一步恶化。多年来防风固沙、恢复生态成为该地区造林的主要目标,研究地营造了大量的杨树、山杏、小叶锦鸡儿、文冠果和踏郎等不同类型的防风固沙林,而人工林的稳定性问题就成为首要的问题。本文采用空间代替时间方法从种群中的年龄结构分析入手,对不同发育阶段的人工固沙林的稳定性进行分析,以该地区主要的防风固沙林小叶锦鸡儿、文冠果和踏郎为对象,通过种群地表土粒度统计分析、种群结构变化、尤其对群落中物种侵入过程和群落组织结构不同发育阶段变化情况做了详细分析,群落各龄级物种多样性的测定及比较、立地质量变化以及对种群稳定性进行综合评价,进而来测度其人工林群落的稳定性,为该地区沙地植被恢复和重建提供理论依据。研究结论如下:

本文通过对科尔沁地区三种不同人工固沙林进行土壤地表土粒度特征综合分析,可以较为清晰地得出,三种不同种群地表土粒度分化较明显,表现出一定的规律,即小叶锦鸡儿和文冠果随着龄级的增加表现出沙粒段即(1-0.05mm)粒径段所占比例逐渐下降,而粗砂粒(1-0.25mm)所占比例逐渐上升,同时细砂粒(0.25-0.05mm)出现下降趋势,而踏郎种群按照破中、坡上和坡下顺序则同样也表现出这规律。即半固定沙地(小叶锦鸡儿、文冠果样地)最为粗化且分选较好,峰值较大,其次为半流动沙地(踏郎样地),表现出风蚀沙化的阶段性。根据土壤粒度分布特征对土壤风蚀的影响,得出不同龄级小叶锦鸡儿和文冠果地表土敏感颗粒敏感粒径段占易蚀粒径段的相对值大小表现为,小叶锦鸡儿:自然沙地 $>6a>14a>20a>27a$;文冠果:自然沙地 $>3a>18a>31a>44a$;踏郎:自然沙地 $>破中>坡上>坡下$,在一定程度上认为,该地区大范围的沙尘暴天气的尘源物主要来源于自然沙地及栽植人工林生长植被较少的低龄级林地表土颗粒。

小叶锦鸡儿人工固沙林具有一定的更新能力,随着年龄的增长,幼苗增长数量大致等于成年死亡数量,在一定程度上体现为稳定种群。但随着时间的进一步推移,幼苗数量开始减少,种群结构呈衰退型,物种多样性减少,由于水分、养分等条件下降,发育至27a时出现衰退现象。综合判定结果,20年的小叶锦鸡儿人工固沙林稳定性最好。

文冠果人工固沙林在该地区随着龄级的增长,幼苗的数量减少,大径级的个体数增多,这说明文冠果物种本身萌蘖能力较差,如果没有人为进行抚育更新,由于受温度、水分立地质量等条件的限制,文冠果自身的更新延续是比较难,总体上文冠果种群体现出衰退种群,大多数个体已经过了生殖年龄,种群的大小趋向减少,但文冠果人工林的稳定性较好,能够更好地适于当地环境,发育至44a的文冠果人工固沙林稳定性最好。

踏郎灌木是科尔沁半流动沙地防风固沙林的主要物种之一,在林分的质量和生产力方面有很强的优势,是一种很好的耐干旱树种,作为一种重要的固沙物种,它发挥着很大的作用。通过对踏郎人工林不同生境条件的研究表明:踏郎的稳定性受不同生境土壤

水分、养分等影响，坡下踏郎种群稳定性比较好，总体上踏郎种群体现为增长种群，有许多幼年个体，物种本身萌蘖能力很强，补充率大于死亡率，种群继续扩大，稳定性也逐渐增强。综合判定结果，坡下的踏郎人工固沙林稳定性最好。

最后选择三种不同树种人工固沙林中最稳定的种群重新按照同物种方法进行稳定性比较，得出结论：20a 的小叶锦鸡儿人工固沙林稳定性最好，44a 文冠果次之，踏郎坡下相对较差。这说明在科尔沁沙地栽种的这三种主要的人工固沙林中，小叶锦鸡儿固沙林的稳定性最好，这与树种本身的特性有关，小叶锦鸡儿人工林还是比较能适应该地区自然条件，在起到防风固沙作用的同时自身群落的结构和功能达到一个相对比较稳定的状态；文冠果人工林整体随着发育而稳定性在增强，但更新能力较差；同时也能得出踏郎人工林在半流动沙地上适应性极好，有很强的耐旱性和自身的萌蘖能力，对生态环境前期恢复有很强的发挥作用，是该地区进行人工治理半流动沙地不可缺少的优良物种。

本文最终针对小叶锦鸡儿、文冠果和踏郎三种人工固沙林稳定性研究得出对于科尔沁沙地稳定的人工固沙林群落应具备以下条件：（1）适于当地环境条件（2）对外界干扰具有一定的抵抗性和恢复性（3）具有正常生长发育和自我更新能力（4）有较为完善的种群结构。

关键词 科尔沁沙地；防风固沙林；种群结构；多样性；立地质量；稳定性

Abstract

Horqin Sandy is one of main sand in China. Due to soil erosion and desertification continues to expand, ecological environment further deterioration. In recent years, the sand-fixing and ecological restoration is the main object of afforestation in this region. There are many wind protection and sand fixations such as Poplar, *Prunus armeniaca*, *Caragana microphylla*, Shiny-leaved yellowhorn and *Hedysarum Laeve*, and so on. The stability of plantation become the primary problem. The stability of *Caragana microphylla*, Shiny-leaved yellowhorn and *Hedysarum Laeve* for wind protection and sand fixation in Horqin sandy land has been studied. The study includes the statistical analysis of grain size of surface soil, the changes of population structure, the analysis of the process of species invasion and community structure changes in different developmental stages, the species diversity of community in different age class, the change of site quality and the comprehensive evaluation of the population stability to provide a theoretical basis for rehabilitation and reconstruction in this area. The main conclusions can be drawn from paper as follows:

Based on the comprehensive analysis of grain size of surface soil of three different artificial sand fixations, the differentiation of grain size of surface soil in three different populations was obvious and showed some regular. The proportion of sand (1-0.05mm) decreased with the increase of age class of *Caragana microphylla* and Shiny-leaved yellowhorn. The proportion of coarse sand (1-0.25mm) increased gradually and the fine sand (0.25-0.05mm) declined. The *Hedysarum Laeve* also showed that law follow the middle slope, the upper slope and the below slope. The semi-fixed sand (*Caragana microphylla* and Shiny-leaved yellowhorn) were the most coarse and good separation. Semi-mobile sand (*Hedysarum Laeve*) showed the wind erosion and desertification stage. According to the inference of grain size of soil on the soil erosion by wind, the relative value of sensitive to grain size accounted for easily erodible segment of grain size of surface soil showed: *Caragana microphylla* was as follow: nature sand > 6a > 14a > 20a > 27a. Shiny-leaved yellowhorn was as follow: nature sand > 3a > 18a > 31a > 44a. *Hedysarum Laeve* was as follow: nature sand > the middle slope > the upper slope > the below slope. To some extent that the dust sources mainly come from the surface soil of natural sand and younger age-class forest lack of plantations.

The artificial sand fixation of *Caragana microphylla* belonged to stable population in certain developmental stage. It had a certain ability to update. With the age increase, the number of seedling growth equaled to the number of adult deaths. To some extent it can reflect the stability of population. However, as time goes further, the number of seedlings began to reduce; population structure was recession-type, species diversity decreased. The population

structure began recession when 27a due to moisture, nutrients and other conditions decreased. In short, the stability of 20-year *Caragana microphylla* was the best.

With the growth of, the number of seedlings decreased, the number of large diameter increased. It showed that Shiny-leaved yellowhorn itself less able to reproduce without artificial reproduction, due to temperature, water quality and other site conditions. The population of Shiny-leaved yellowhorn began recession. The majority of individuals have passed the reproductive age, population size tends to reduce. But the stability of Shiny-leaved yellowhorn was better, and it can better fit the local environment. The stability of 44a Shiny-leaved yellowhorn was the best.

Hedysarum Laeve is one of the main species of wind protection and sand fixations in Horqin sandy, it has strong advantage at quality and productivity and plays a significant role as an important fixing species. By studies of *Hedysarum Laeve* in different habitats showed that: the stability of *Hedysarum Laeve* wasn't influence by soil moisture, nutrients and other effects. The stability of *Hedysarum Laeve* on the below slope was better. The population of *Hedysarum Laeve* was growth. There were many young individuals and the population continued to grow. The stability increased gradually. In conclusion, the stability of *Hedysarum Laeve* on the below slope was the best.

Finally, the most stable populations of three species compared, results showed that the stability of 20-year *Caragana microphylla* was the best. 44a Shiny-leaved yellowhorn second, and the stability of *Hedysarum Laeve* on the below slope was relatively poor. This shows that the stability of *Caragana microphylla* was the best in three major artificial fixation in Horqin sandy. *Caragana microphylla* can adapt to natural conditions in the region. It can play a role in sand fixing while the structure and function achieve a relatively stable state. The stability of Shiny-leaved yellowhorn increased with the growth, but less able to update. *Hedysarum Laeve* was adapt to the semi-mobile sand and had strong drought tolerance. It play a strong role to restorate the ecological environment, and was a good species to manual control sand.

Base on the study of stability of three wind protection and sand fixation in Horqin Sandy, the stable fixation forest communities should have the following conditions: (1) suited to local environmental conditions, (2) have a certain resistance to outside interference and restorative, (3) with normal development and self-renewal capacity, (4) have population structure of more perfect.

Keywords Horqin sandy land; plantation for wind protection and sand fixation; population structure; biodiversity; site quality; stability

1 绪论

1.1 科尔沁沙地概况及成因

近半个世纪以来,土地荒漠化严重地在我国北方蔓延扩大,威胁着人们的生存条件。特别是在干旱、半干旱及半湿润干旱区,风蚀、水蚀造成的土壤流失,土壤的理化性质生物特性退化及自然植被长期损失,使该地区的农田、草原、森林和林地生物经济生产力下降或损失^[1]。备受瞩目的世界三大生态建设工程-斯大林改造大自然计划、非洲五国联合绿色坝工程、中国的三北防护林工程,诸多专家、学者历尽千辛万苦,倾注了大量精力,可以说在人类认识自然、改造自然上已给人类以有益借鉴,探讨并总结出了许多成功模式和做法。随着我国对生态建设和资源保护工作的高度重视,随着国家六大生态建设工程的深入,土地荒漠化防治已经并且必将是我国林业事业发展的一个重要课题,也是人类与自然长期相处的一个内容,探讨、总结和大力推广土地荒漠化防治技术、方法、模式,也将成为中国构建社会主义和谐社会的一项内容。显然,在土地荒漠化防治方面做深入研究非常必要。所谓荒漠化,是指包括气候变异和人类活动在内的种种因素造成的干旱、半干旱和半干旱亚湿润地区的土地退化,它是全球性的重大环境问题,直接威胁着人类社会生产发展的基础,被称为“地球的癌症”^[2]。据统计,全球近36亿公顷耕地和牧场受到荒漠化的威胁,荒漠化不仅对人类的生存环境造成严重危害,而且是导致贫困、社会动乱和阻碍经济、社会可持续发展的重要因素。当今世界,土壤荒漠化是全球性的环境与资源问题之一。涉及各大洲的100多个国家,大约20亿人口受到危害,我国是世界上荒漠化面积较大、分布较广、危害较严重的国家之一^[3]。截至2002年全国有沙漠、沙漠化土地、风沙化土地262.2万 km^2 ,占国土面积的27.3%,并且平均每年以2640 km^2 甚至更快的速度扩展面积^[4-6]。据估算,仅在我国每年因荒漠化造成的直接经济损失达540亿元^[7,8]。荒漠化所造成的环境恶化和经济贫困严重制约着生态建设和经济发展,改善生存条件,治理荒漠化已迫在眉睫。中国政府十分重视土地荒漠化的防治工作,组织了多方面的调查研究与规划,并将其作为重大生态建设工程纳入国民经济和社会发展规划。但是,由于气候的差异和人类活动种种因素的影响,虽然局部地区土地荒漠化得到治理,而从整体来看,荒漠化仍在扩展加深,每年仅风蚀造成荒漠化的扩展面积达2100 km^2 ,严重地影响着沙区资源、环境的可持续发展。因此,为了加快沙地治理,搞好植被建设,选择研究抗旱性强,适应性广,具有生态和经济双重效益的人工稳定性树种就成为最主要工作,而人工灌木的稳定性研究作为水土保持是一项非常重要的技术^[9]。

科尔沁沙地位于大兴安岭南段东坡、松嫩平原西南部,地理位置介于东经116°49'13",至123°30'51",北纬42°21'3",至45°21'10",是我国面积最大、人口密度最高、交通枢纽最集中的沙地。科尔沁沙地主要分布在西辽河中、下游主干及支流的冲

积平原上,行政区域在内蒙古自治区东部的兴安盟、通辽市、赤峰市和辽宁省的沈阳市、朝阳市、中一新市、铁岭市以及吉林省西部四平市、松原市、白城市,总面积约 5.1 万 km^2 ,其中大部分在内蒙古自治区境内^[10]。

据 2004 年全国第二次荒漠化和沙化监测结果:辽宁省沙化土地 95.4%分布在科尔沁沙地区域内,并呈逐年递减趋势;科尔沁沙地在吉林省主要分布于西辽河下游支流沿岸的冲积平原上,近年呈现出扩展趋势;内蒙古自治区境内的科尔沁沙地面积为 3.7 万 km^2 ,比 1999 年的 4.2 万 km^2 减少了 0.5 万 km^2 ,呈现出沙化整体逆转态势^[11]。

科尔沁沙地是在东北平原近代开发和发展过程中逐步形成的。历史上的科尔沁曾是“地沃宜种植,水草便畜牧”的好地方,直到清朝初年,还是“长林丰草,马驼牛羊之孽急者,岁以千万计”的肥美草原。但是,近 200 年来,特别是 20 世纪初期,由于自然环境、气候因素、人为作用、不合理开发活动的共同作用,使昔日的草原绿色消失,美丽的草原渐渐被浩瀚的沙地所取代^[12]。

尽管人们对科尔沁沙地的专项研究较晚,但作为一个独立的自然区它确实是客观存在的,因为它具有悠久的发育历史,具有特殊的区位条件,特别是沙地景观已构成了这一地区的基本特色,沙漠化已成为这里区域经济开发和生态环境治理的主要问题^[13]。

科尔沁沙地成因主要有自然因素和人为因素两方面。前者是形成沙地的潜在因子,后者是引起和加速沙地化的主导因子^[14]。降雨、风力、温度等自然气候条件是形成沙漠化的主要自然成因。从近百年的历史资料及当前现状看,科尔沁地区的降水量并没有大的波动,只是在有些年份分布不均衡,气温呈上升趋势。从沙化科学定量分析数据和现存沙地生态系统结构中证明,科尔沁沙地中一些地方原生植被生长良好,水资源较丰富,由原木植被良好逐步演变成沙化土地,自然原因只是形成科尔沁沙地的外部辅助因素,过牧、过垦、过采等人类活动是加速土地沙化的主要内部因素。

自然因素:科尔沁沙地除北部石质山地外,大部分为西辽河平原和大兴安岭山前洪积冲积平原。在冲积平原上自第四纪以来堆积厚度最深约 200m 的松散沙质沉积物,这些粘性很差的松散沙物质是沙漠化发生发展的物质基础。其组成以物理性沙粒($>0.01\text{mm}$)为主,结构松散,内聚力差,在干旱和强风作用下容易发生风蚀风积,形成风沙地貌。以沙粒成分为主的表层沉积物和沙性土壤在本区的广泛分布,构成了本地区地表物质的主体和风沙环境的物质基础^[15]。

人为因素:根据土壤剖面和历史资料考证,早在 5 千年前的新石器时代,科尔沁沙地就有人类活动,到秦汉时期,本区受到了人类较大规模的破坏。汉朝以后,本区相继为匈奴、乌桓、鲜卑族等少数民族统治,农业衰退,畜牧业兴旺,科尔沁沙地又得到了恢复。在辽宋时期,该区出现了沙漠活化的现象,尤其是辽建国初期,大批汉民北迁,促进了这里农业的巨大发展,引起了沙漠化的迅速发展。元明时期,这里又基本变成蒙古族的活动范围,本区一度因游牧地带人烟稀少而又逐渐恢复为森林草原景观。18 世纪初清政府向该地区大量移民,开始了大规模的农垦,逐渐使之变成半农半牧的经济结构,政府大肆倡导开垦科尔沁沙质草地。当沙质草原被开垦后,一般只经过 1-2a 即因

风沙灾害而撂荒, 随后又重新开垦沙地, 由此导致植被破坏, 表土松动, 丧失保护, 久而久之, 沙漠活化, 兼存在半干旱多风的气候, 必然形成半流动和流动沙丘, 并以斑点状首先呈现于居民点、放牧聚散点、饮水处、耕地附近以及河流的沿岸, 进而扩展连片^[16]。

一是过度开垦。科尔沁沙地曾经是疏林草原, 为了满足人口增长的需要以及以粮为纲政策的推动下, 科尔沁草原经历了数次大规模有组织的垦荒, 使科尔沁地区从传统的以牧为主演变成农牧交错地区, 耕地面积持续扩大^[17]。由于人口和牲畜数量的增加, 对粮食和饲料的需求不断增多, 人们片面地追求作物产量, 过度开垦荒地, 往往采用广种薄收的落后生产方式, 种植 2-3a 后进行撂荒。尤其是解放后, 在科尔沁沙地, 仅开荒种打瓜、散糜黍然后弃耕, 每年就有 1300 多 hm^2 草原沙漠化。如到 1985 年翁牛特旗新开沙荒地是原耕地面积的 1.75 倍。在草原上大规模开垦, 毁坏了地表植被, 再次翻耕, 就可以破坏原有土壤结构, 加快水分蒸发。研究表明, 在科尔沁沙地中, 农田的潜在可风蚀性最强, 在干旱、大风等气候因素的作用下, 不稳定农田生态系统可以迅速逆转, 从而形成沙地, 近年来, 极度干旱就使许多沙地农田呈现出明显的沙化趋势^[18]。目前有些地区甚至把基本打草场也开垦为农田, 垦荒的结果是, 植被遭到进一步破坏, 草原面积缩小, 土壤失去植被的保护作用, 加上土壤的沙质特性, 在土壤表层开始风蚀沙化, 为土壤沙漠化的发展打开了缺口。随着风蚀的进一步发展, 形成风蚀坑, 流沙开始蔓延, 最后形成片状流沙。

二是草原过度放牧。随着草原开垦, 自然草场面积逐步缩小, 加之社会经济发展对畜牧业的需求, 在以数量扩张型为主的畜牧业粗放经营方式的推动下, 牲畜头数持续增长, 草原承载能力减弱, 植被盖度降低, 草原得不到有效的休养生息, 从而加剧了沙化的态势^[19]。近几十年来由于盲目追求牲畜存栏头数, 羊均占有的草场面积迅速减少, 造成草场超载过重。以赤峰市北部五旗为例, 五旗共有 $3.595 \times 10^6 \text{hm}^2$ 天然草场, 丰年、平年和欠年暖季理论载畜量分别为 576.2、460.9 和 345 万羊单位, 冷季理论载畜量分别为 528.3、420.4 和 312.6 万羊单位, 而 1985 年暖季和冷季实际拥有的牲畜头数分别为 672.15 和 589.2 万羊单位。以这一年为标准, 平年各旗超载 15%-72%, 欠年超载 76%-131%, 即使是丰年也超载 4% 以上, 冷季阿鲁科尔沁旗甚至超载 83.19%。在长期严重过度放牧条件下, 牧草不能正常生长发育, 植被没有恢复和生息的时间, 逐步遭到毁坏。中国科学院兰州沙漠所曾做过连续放牧试验, 当试验进行到第 2 年 7 月中旬时, 植被盖度由放牧前的 42.14% 减到重牧后的 4.91%。群落高度由 22cm 降低到 4cm。植株变得低矮稀疏, 地而裸露, 地表沙质土壤失去植被的保护作用, 从秋季开始, 在大风的作用下, 地表流沙开始蔓延。同时由于牲畜密集的践踏使沙质草原地表破损, 形成沙地缺口, 经大风吹扬, 大量出现风蚀坑、槽在下风处发生沙土堆积。又由于畜牧业生产管理水平低, 居民点集中, 长期就近放牧, 使居民点周围的草场沙化碱化面积不断扩大。

三是过度樵采。随着人口增长的压力, 对生活燃料的需求量急剧增加。在科尔沁地区, 农民所烧的柴草大部分是从草场上砍来的, 在一些半农半牧或纯牧业区, 农牧民

50%以上的燃料来自于草原上的林草,据调查,满足一户农牧民的生活燃料,基本上要2-3hm²草场的林草。严重樵采,不仅降低了沙地中的林草覆盖度,而且对林草本身生长影响极大,破坏了表土结构,最终为土壤风蚀沙化创造了条件,加快了土地沙化的速度^[20]。随着人口的增长,人们对薪材的需求量增加,本地区的薪材来源主要是沙区的灌木和半灌木。由于大量樵采使植被遭到严重破坏,尤其是20世纪80年代以前,为解决燃料问题,当地居民冬季大量搂草也非常普遍,不仅使地表失去仅有的地被物,而且活化了表土,促进了沙漠化的发展。同时副业性采集,如割柳条、挖甘草和割麻黄等也使原有植被遭到很大的破坏,为沙丘的活化打开了缺口,导致沙漠化的发生和发展。另外,在西辽河及其支流上游兴建了数座水库,层层拦截防洪,蓄水扩灌,使下游地区地下水位下降,不少湖泊、池沼及河道干涸,造成生境的干旱化,不少地区喜湿的植物种类减少甚至绝迹,代替的是耐旱的植物种,植被盖度减小,对地面的保护作用减弱,使沙丘开始活化。同时经常出现的河水断流情况,使河床上的沙物质为沙漠化的发生发展提供了新的物质来源。由于以上各种因素的综合作用,最终使丰美的科尔沁草原沦为严重的沙漠化土地。

1.2 人工林群落物种多样性研究综述

物种多样性是生物多样性在物种水平上的表现形式,包括两个方面,一是指一定区域内物种的总和,主要从分类学、系统学和生物地理学角度进行研究,称区域物种多样性;二是指生态学方面物种分布的均匀程度,从群落组织水平上进行研究,称为生态多样性或群落多样性^[21]。群落物种多样性格局是由进化过程、历史事件和地理环境共同导致的结果。任何群落的物种多样性都是矛盾双方的平衡统一,一方面局部的非生物过程、种间关系和一些偶然事件趋向降低群落物种多样性;另一方面来自其它群落的迁移等趋向于增加群落物种多样性^[22]。有大量证据表明局部力量与过程严重地影响着共存物种数量,一些研究已经发现物种多样性随着养分的丰富与贫乏、捕食者的迁移与引进和气候变化等而改变,这些试验的最通常结果是局部灭绝,导致多样性的减少。干扰在导致不适应环境改变的物种消失的同时,也为其它适应物种的扩散与侵入创造了新的生态机会。本文所涉及物种多样性即为群落组织水平上的物种多样性。

物种多样性是地球生命经过几十亿年发展进化的结果,是人类赖以生存和持续发展的物质基础。可以说,保护物种多样性就等于保护了人类生存和社会发展的基石,保护了人类文化多样性基础,就是保护人类自身。物种多样性研究以系统学为基础,探讨物种多样性的空间格局、时间格局和生物学格局,从进化与系统发育的角度认识物种多样性的产生与发展历史。物种多样性研究的主要内容集中在物种多样性的现状(包括受威胁现状)、物种多样性的形成、演化及维持机制等方面。区域物种多样性的测度方法包括:①物种丰富度②单位面积物种数目或物种密度③特有物种比例④物种多样性的区系成分分析。

一个地区群落物种多样性是该地区植被恢复和保护的基础^[23],人工林植被对改善土

壤肥力,减少林地水土流失,改良当地小气候等都具有明显作用。人工林物种多样性的提高,可有效减轻林分病虫害的发生,增加生态系统的稳定性^[24]。

由于物种多样性是一个区域或一个生态系统可以测定的生物学特征,具体的说是反映一个生态系统结构与功能的重要特征,从物种组成方面研究群落的组织水平或多样化程度的工作已有较长的历史,方法也相对比较成熟。自 1943 年 Willians 就提出了物种多样性概念^[25]讨论有关物种多样性的概念、原理及测度方法和形成原因或主要影响因素等问题的论文和专著已大量发表^[26]。特别是在 70 年代后期,国际上开始重视生物多样性正在快速灭绝这个问题,关于物种多样性保护的研究大大加快。关于人工林群落物种多样性研究大致有两种观点,一种观点的人认为,人工林能支持的物种多样性与乡土植被没有差别。另一种观点的人认为,人工林的物种组成是单调的,是对生物多样性保护及维持的威胁,并认为人工林往往是由侵入性强的先锋树种所组成,它的侵入常使当地种的群落片断化或取代乡土植物种而引起毗邻的生态系统生物多样性下降^[27]。我国是世界上发展人工林最为突出的国家,人工林面积居世界首位,人工林的稳定性问题也受到林业工作者的高度重视。在降水量 350mm 左右的地区,目前能在流沙上进行的人工造林的植物种有小叶锦鸡儿、文冠果、踏郎、花棒、油蒿、籽蒿、沙蒿等^[28]。

群落物种多样性越高,群落越稳定,各物种数量分配机制比较合理,对外来种侵入的敏感性降低,即稳定性增强^[29,30]。新侵入的物种由于其在资源利用、繁殖扩散等方面独特的生理功能会与原来物种形成新的竞争格局,并改变群落的结构,进而使群落的功能发生改变^[31]。

我国人工林物种多样性的研究也取得了明显成就。应用丰富度、多样性、均匀度指标,阎海平等研究了北京西山地区 10 种人工林群落的物种多样性,结果表明:大多数群落的 Shannon-Wiener 指数 H 在 1.5-3.0 之间,且与物种丰富度指数的变化趋势一致,使用效果比较理想;不同人工林群落中,乔木第一亚层的物种丰富度指数和 Shannon-Wiener 指数均低于乔木第二亚层,而 Simpson 指数则相反;不同人工林群落中,棚树和华山松林物种丰富度和 Shannon-Wiener 指数较高;草本层的物种丰富度和 Shannon-Wiener 指数高于灌木层和乔木层,而乔木层和灌木层没有明显的差异;各多样性指数在不同群落间的变化幅度均为草本层>灌木层>乔木层^[32]。对山西五台山林区 4 种典型人工林群落物种多样性特征进行了定量研究,周择福等的研究结果表明:4 种人工林群落灌木层和草本层的 Simpson 指数 (D) 和 Shannon-Wiener 指数差异不显著,物种丰富度指数和均匀度指数 (J_{sw}) 差异显著,均匀度指数 (E_a) 差异极显著^[33];通过对江西省泰和县狗丝茅岭低丘荒山人工造林 10a 的人工生态系统中 8 种人工林主要类型和 1 个对照区进行研究,秦新生等的研究结果显示:人工林类型、林分组成和林分密度对物种多样性的影响较为明显,其中林分密度的影响最为显著;不同造林树种其林下植被物种多样性以针叶纯林稍占优势,针阔混交林次之,而阔叶纯林相对较低;针叶林林下植被物种多样性虽然最高,但针叶林土壤的持水力相对较差,有机质含量也较低,而阔叶纯林相对较好,针阔混交林则最佳^[34]。对南岭东段的莽山和西段的猫儿山植物群落乔木层物种

多样性的垂直分布格局进行了比较研究,朱彪等的研究表明:莽山和猫儿山的植被类型差异不大,但相同植被类型的物种组成有比较明显的差异。随海拔的上升,两山体乔木的最大树高均呈现显著下降趋势^[35],对人工生态系统物种多样性研究是退耕还林、天然林保护等生态环境工程的延伸,对于人工林的管理与评价具有重要意义。

1.3 人工林群落稳定性研究综述

人工林稳定性问题一直是生态学家普遍关注的主题之一,稳定性是生态系统存在的必要条件,在理论与实践具有深远意义,被公认为是生态系统重要的基本特征。

稳定性是植物群落结构与功能的一个综合特征,人工林群落稳定性研究是生态学的重要课题,是生态环境的前沿和需求热点。人工植被一般指通过植苗造林、播种等人工措施建立的用材林、水土保持林、农田防护林、防风固沙林以及人工草地、草坪等植被类型,人工植被普遍存在着稳定性差、生长不良和功能衰退问题^[36]。对杉木(*Cunninghamia lanceolata* (Lamb.) Hook)、马尾松(*Pinus massoniana* Lamb)、桉树(*Eucalyptus* spp)、油松(*Pinus tobulaeformis* G arr)、杨树(*Populus* spp)和樟子松(*Pinus sylvestris* var *morgolica* Litvin)等主要树种人工林的结构与功能进行了深入的研究,基本搞清了影响人工林群落稳定性的主要因素^[37]。试验提出了营造具有较高稳定性的混交林的理论与技术并应用于生产实践指导植被建设^[38]。对影响北方黄土高原水土保持植被和干旱荒漠地带防风固沙植被稳定性的主要因素-林地水分平衡进行了大量研究,并从物种选择和植被配置格局方面提出了解决的措施,指出适宜的密度是维持荒漠人工植被稳定性的必要条件^[39]。许多研究表明,人工林植被稳定性差的主要原因有:1、林地养分耗竭,地力衰退^[40]2、人工干扰阻断了林地养分循环方面 3、由于树种单一造成的生物地化循环方面的变化使土壤物理性质恶化,如土壤酸化,微生物活动微弱 4、群落生境单一,病虫害暴发成灾^[41]5、北方干旱半干旱地区人工植被土壤旱化^[42]6、物种选择不当,不能很好适应恶劣的立地条件^[43]。

研究植被稳定性不仅可以直接了解陆地植被本身稳定性的特征和规律,为天然植被的保护利用和建立稳定的人工植被提供科学依据,进而在满足人类经济目标的同时保持地表植被的完整和保证其功能的发挥,而且也是认识生态系统稳定性的必要途径,为认识一般意义上的生态系统稳定性提供基础资料和实验证据。尤其在干旱、半干旱地区,对植被稳定性的研究具有很重要的意义,在植被恢复和重建的过程中,稳定性的研究将为合理的植被配置方式提供依据^[44]。

1.3.1 群落稳定性概念

群落稳定性是指一个群落内种类组成保持恒定不变,自然群落的稳定性取决于物种的多少和种间相互作用的大小,物种的多少是群落稳定性的基础,种间相互作用只起补充作用。群落稳定性则用弹性、抗性及变异性等来衡量,一个稳定的群落表明其初级生产力高,资源的可持续性大,对资源的利用更加充分和高效,对外来种入侵的敏感性降低,即稳定性增强。根据群落或生态系统的某一特征或现象,如物种组成、种群密度、

生产力以及其功能过程等来研究群落稳定性^[45-47]。对稳定性的量化处理是解决二者关系的关键所在,近来有研究将优势度用来衡量群落的稳定性,优势度大,稳定性高^[48]。有人则认为,物种多样性作为群落稳定性的指标,具有良好的效果^[49]。物种多样性和群落稳定性之间的关系如何、又应当如何去衡量,有待进一步深入细致的研究。

生态系统稳定性^[50,51],即系统抵抗外力干扰的能力或扰动后一个系统保持一个平衡点的能力;恢复力(Resilience),即系统经历干扰后恢复到初始状态的能力;持久力(Persistence),即生态系统在一定边界范围内保持恒定或维持特定状态的历时的长度;变异性(Variability),即描述系统在给予扰动后,种群密度随时间的变化的大小。

稳定性的外延包括局部稳定性(Local stability)或领域稳定性(Neighborhood stability):系统受较小干扰仍能恢复到原来的平衡点,而受较大干扰后则无法恢复到原来平衡点的稳定;全局稳定性(Global stability):系统受到较大干扰后远离原来平衡点仍能恢复到原来平衡点的稳定;结构稳定性(Structure stability):在系统状态方程里,扰动引起的参数变化可通过转移矩阵的传递,当数学解在空间的变化小到可以忽略时,便说明系统的传递矩阵性能较好,即系统结构稳定,在于强调系统组成的有序性;循环稳定性(Cyclic stability):在系统经过一系列变化后仍能恢复原来状态的特性;轨道稳定性(Trajectory stability):系统在其原有状态被扰动并改变或各种不同的新状态原某一状态的倾向;相对稳定性(Relative stability):反映领域稳定性和全局稳定性的质的概念,同时在稳定域内外的系统状态有质的区别。

但对生态系统或群落稳定性的定义,无论在含义上还是在外延上都不够全面,而且它们之间无法比较,并很难量化。

稳定性概念有多种不同的定义,在生态学领域稳定性是一个引起广泛争议的概念^[52]。在实际研究中不同的学者根据所研究的具体群落或生态系统的情况在不同的意义下使用稳定性概念^[53-55]。稳定性(stability),是指系统受到外部扰动后保持和恢复其初始状态的能力,在一定程度上是基于热力学原理的概念^[56]。近百年来,李亚晋诺夫创立的稳定性理论框架,已经渗透到应用数学、力学、化学、生物学、控制论和系统理论等的众多领域,取得了巨大的发展^[57]。综合稳定性研究的各种文献,各个学者使用的稳定性概念可以归纳为3个基本类型^[58,59]:1、群落或生态系统在达到演替顶级后出现的能够进行自我更新和维持并使群落的结构、功能长期保持在一个较高的水平、波动较小的现象。其中结构指标是群落的物种组成,特别是优势种或建群种的种群稳定对群落稳定有决定作用。功能则指物质与养分循环、生物量和生产力等代表性指标;2、群落或生态系统在受到干扰后维持其原来结构和功能状态、抵抗干扰的能力,称抵抗力稳定性;3、群落或生态系统受到干扰后回到原来状态的能力,称为恢复力稳定性。其中1的稳定性概念主要与群落演替有关,早在Clements^[60,61]研究群落演替时就已提出和使用,认为顶级群落是生物与环境在长期相互作用演变过程中相互适应和协调统一的产物,具有维持其结构和功能相对不变的稳定性,称为演替稳定性。2和3的稳定性概念主要关注植被在受到干扰后的反应,是目前比较公认的稳定性的概念^[62],由于在定义中与干扰相

联系，称其为干扰稳定性。

3 种稳定性概念在目前的研究中都在使用，三者的含义即相联系又有所区别。由于群落演替是生态学中最重要的概念之一，因而演替稳定性是最早被普遍接受和广泛认同的稳定性概念。群落演替与稳定性有着紧密的联系，对认识植被稳定性有着非常重要的实际意义，至今很多学者在讨论稳定性时都是以演替稳定性概念为基础进行的。干扰稳定性概念的情况则有所不同，由于具体的干扰形式对群落的影响具有不同的性质，群落受到干扰后的反应也与群落的类型有关，因此，当与干扰相联系后，情况就变得更为复杂。概念上的差异给稳定性研究带来了一定的困难，并在一定程度上影响了人们的交流和这一领域的进展，所以在进行稳定性的讨论和研究时，弄清是在何种意义下讨论稳定性是必要的。

植物学家 MacArthur^[63]首次提出了群落稳定性的概念，其含义为一个群落内种类组成和种群大小保持恒定不变。动物学家 Elton 也提出了与 MacArthur 相类似的概念，他认为一个稳定的群落是指不易受外来种的入侵，其结果是种类组成和种群大小保持恒定。在现代生态学领域中，有关稳定性的概念引起了广泛的争论。文献中定义稳定性的术语有不下 40 个^[64]。但生态系统稳定性的概念一般包括：抵抗力、恢复力、持久性、变异性^[65,66]。稳定性概念都是和特定的研究相联系的，纯粹的稳定性在生态学上没有实际意义，相反它是生态系统所有特点的一个综合。周集中、马世骏^[67]把抵抗力和恢复力定义为生态系统对外界干扰的响应，把持久性和变异性看成两个描述性概念，没有涉及生态系统应付外界干扰的能力；现实的自然界生物群落存在着不同程度的外力干扰，这种对稳定性内涵的理解过于理想化；黄建辉^[68]把抵抗力、恢复力、持久力、变异性均描述为扰动后系统的反应。

自从群落稳定性的概念被提出以后，便被生态学家频繁地使用，主要分为两类：抗性和弹性。但随着研究的深入，人们从不同的发展角度对其进行了发展和补充。到目前为止，不同的学者谈及生态系统稳定性时，往往赋予其许多不同的内涵和外延，概括如下：

(1) 具有不同内涵的稳定性概念

恒定性 (Constancy)：指生态系统的物种数量、群落生活型或环境的物理特征等参数不发生变化。

惯性 (Inertia)：生态系统在风、火、病虫害以及食草动物数量剧增等扰动因子出现时保持恒定或持久的能力^[69]。

持久性 (Persistence)：指生态系统在一定边界范围内保持恒定或维持某一特定状态的历时长度。

弹性 (Resilience)：指生态系统受干扰后恢复原来功能的能力^[70,71]。

恢复性 (Elasticity)：与弹性同义。

抗性 (Resistance)：生态系统受干扰后产生变化的大小^[72]。

变异性 (Variability)：系统在受干扰后种群密度随时间变化的大小。

变幅 (Amplitud): 生态系统可恢复的受干扰范围, 即被改变并能迅速恢复原来状态的程度。

(2) 具有不同外延的稳定性概念

局部稳定性 (Local stability): 系统受较小的扰动后能回复到原来的平衡点, 但受到较大的扰动后则无法回复到原来的状态, 为局部稳定或邻域稳定。

全局稳走性 (Global stability): 系统受到较大的扰动后仍能回复到原来的状态, 则该系统具有全局稳定性。

结构稳定性 (Structure stability): 在系统状态方程里, 参数的变化 (扰动引起), 可通过转移矩阵的传递, 在解空间里反映出来, 当数学解在空间的变化小到可以忽略时, 便说明该系统的传递矩阵性能较好, 因而称该系统为结构稳定^[73,74]。

循环稳定性 (Cyclic stability): 生态系统经过一系列变化后仍能恢复原来的状态的特性。

轨迹稳定性 (Tajejectory stability): 生态系统在其原有状态被扰动并改变成各种不同的新状态后恢复至某一最终状态的倾向。

相对稳定性 (Relative stability): 反映系统稳定程度的量化概念。

绝对稳定性 (Absolute stability): 反映邻域稳定和全局稳定的概念, 因为在稳定域内外的系统状态有质的区别。

1.3.2 群落稳定性机制

稳定性的机制问题, 一直是生态学家关心的热点问题, 解释群落的稳定性机制的理论有很多, 其中比较重要的有多样性理论, 冗余理论等。

植物群落是生态系统维持相对稳定的基础, 因此生态系统的稳定性在很大程度上取决于植物群落对干扰的抵抗能力和自我修复能力。一般认为衡量植物群落稳定性最重要的尺度是物种组成和结构, 但植物群落是如何通过物种的组成和结构来维持物种的稳定性的, 学术界看法不一, 生态学家先后提出不少理论, 其中比较重要的有: 多样性理论、反馈控制理论、信息网络、冗余理论等。近年来冗余 (redundancy) 问题引起人们的关注^[75,76]。它来自自动控制系统的可靠性理论, 串联系统的可靠性要明显低于并联系统, 提高串联系统可靠性的有效途径之一就是为串联系统中故障率高的元件增加备用元件, 建立一个功能上的并联系统, 这样即使有些元件出现故障, 也不会导致整个系统失效。采用这种并联方式, 即以备用元件来提高系统的可靠程度叫做冗余。在生态学中, 冗余则是指生命系统中两种或两种以上的元件或组分具有执行同一功能的能力, 特别是指那些平时吸收能量很少, 处于非工作状态或半工作状态的组分, 它们在正常工作元件失效的情况下“填补空缺”, 替代执行失效元件的功能^[77,78]。从定义可以看出, 由于多个组分具有执行同一功能的能力, 某一个组分的失效不会造成整个系统的功能失效。虽然冗余是植物群落的一种资源浪费, 但对于植物个体生存繁殖、种群增长及群落稳定性等方面具有重要作用。

植物生态学家 MacArthur^[79]和动物生态学家 Elton^[80]首先提出生态系统稳定性理论,他们认为演替过程中生物多样性增加会使生态系统稳定性增加,之后稳定性概念被广泛使用。在很长一段时间里,多样性增加稳定性理论被视为生态学上有影响的信条^[81]。20 世纪 70 年代初期, Gardner 和 Ashby 应用数学模型研究了生态系统的稳定性后,提出与生物生态学家相反的结论,他们认为生态系统的复杂性导致了不稳定性^[82]。

此后 May 的理论对多样性-稳定性假说冲击更大,他进一步扩充和完善了 Gardner 等人的结论^[83],他认为复杂性的增加将不可避免地削弱系统的稳定性。其后 Pimm^[84]和 Goodman^[85]指出,生态系统的多样性和稳定性之间并不存在着简单的相关关系。McCann 的研究结果表明:物种之间微弱到中等强度的联系对促进群落持续和稳定起着重要的作用,这种联系的存在防止了种群趋向灭绝^[86]。因此,一般性地讨论多样性与稳定性的关系也许并不恰当。很多人认为:在多样性(复杂性)与稳定性之间不存在简单的线性关系^[87],而是可能存在一个多样性(复杂性)的阈值^[88],在阈值以下多样性的增加对植被功能的提高和稳定性的维持是有益的,当多样性增加到一定程度后它对植被的功能和稳定性的作用就不再明显^[89]。

冗余(redundancy)这一概念来源于自动控制系统的可靠性理论。系统按照元件的组合方式可以分为串联系统和并联系统,并联系统的可靠性或出现故障率要明显低于串联系统。提高串联系统可靠性的有效途径之一就是为可靠性低的元件提供备用元件,建立一个功能上的并联系统,以便于在元件因干扰而失效时,其余的元件仍能正常工作,不会导致整个系统失效。采用这种并联方式,即以备用元件来提高系统的可靠程度叫做冗余。在生态学上,Odum 把冗余定义为一种以上的物种或成分具有执行某种特定功能的能力,并认为冗余能提高生态系统的稳定性^[90]。1996 年,李跃强、盛承发给生长冗余下了一个定义,认为植物在株高、叶面积、分枝或分蘖数、繁殖器官数量、生育期长度,甚至细胞中酶的组分、基因结构等方面均存在着大量的冗余和重复,总括起来称为生长冗余^[91]。这一概念对生长冗余的描述是合适的,但没有揭示冗余的本质问题。党承林认为冗余在生命系统的各级组织水平上都是存在的,而且多种多样,不一定是生长冗余。在生态系统、群落、种群、器官等各层次上都存在冗余,同时他认为不仅在各层次上存在结构上的冗余,而且还存在功能上的冗余。

曹成有通过在科尔沁沙地的测定,沙地天然小叶锦鸡儿根系深度和分布半径可分别达到 2.0m 和 2.5m,而人工固沙群落内则仅仅为 1.35m 和 0.8m。从植物个体地上和地下生物量的比值来看,天然群落为 0.855,而人工群落为 1.820,也就是说,天然小叶锦鸡儿个体在生物量分配上,把一半以上用于地下部分,以便于使植株能够渡过极端不利条件。而人工群落由于密度过大,植物根系生长受到严格限制,平均单株地下生物量尚不到天然个体的 1/2,但地上生物量却与天然植株相差不多。尽管根系量明显减少,但人工群落植物个体在正常年份仍能维持正常生长。但遇到极度干旱年份则可能会引起群落波动^[92]。

冗余结构理论认为群落内部的并联结构有助于提高稳定性,而串联结构则使稳定性

下降。具有相似功能的多个物种称为冗余物种，冗余物种在系统内部的存在相当于并联结构，而不同营养级之间的关系属于串联结构。冗余包括物种冗余、遗传结构冗余和器官冗余 3 个层次^[93]。冗余理论的实质是冗余物种为群落提供了物种储备，当主要物种由于各种原因不能正常发挥作用时，冗余物种可以及时取代并维持群落功能的稳定。冗余与多样性是相互联系的，群落内的物种多样性相当于为群落提供了物种冗余和遗传结构冗余。冗余结构理论具有一定的解释能力，但仍然属于表面化的解释，冗余物种在群落中的分布、与其它物种的生态关系、冗余物种应具备的特性等细节问题还需要深入研究。

1.3.3 群落稳定性的判定和测度

稳定性的判定与测度是植被稳定性研究中的基本问题，它包括群落在某一时刻是否处于稳定、稳定性的大小比较、对它如何进行测度以及所需采用的指标是什么。在多样性（复杂性）与稳定性关系的研究中多数以生物量变化作为植被稳定性的测度指标^[94,95]，生物量变化越小说明植被的稳定性越高，生物量变化越大说明植被的稳定性越差。种群生态学家用种群数量或大小变动作为评估种群稳定性的指标^[96,97]，群落生态学家则用数量、相对多度型、优势种、物种组成、生产力的变化评估植被的稳定性^[98]。彭少麟^[99]以年龄结构判定和测度森林群落的稳定性。阳含熙等^[100]在建立群落演替模型的基础上把群落演替预测结果与群落现有组成结构进行对比分析来判定和测度群落的稳定性，群落现有的组成结构和数量分布状态与演替预测结果越接近，则群落越稳定；如果群落现有结构与演替预测结果存在差异则群落处于演替过程中的不稳定状态，差异越大则群落越不稳定。Godron^[101]稳定性测度方法以群落内各种植物的相对频度与植物种类数量之间的关系作为稳定性的判定依据。数学模型方法建立群落的微分方程模型和食物网模型通过求解方程的平衡稳定点来判定群落的稳定性^[102,103]。郑元润则把改进的 Godron 法与群落演替预测方法结合起来并比较分析来判定群落的稳定性。从植物-昆虫-天敌食物链关系出发把天敌种数与昆虫种数的比值作为判定稳定性的指标^[104]，比值越高说明天敌的数量多，对昆虫的控制力强，植被越稳定。概括起来，各种研究方法主要以生物量等功能指标或以群落种类组成等结构指标来判定和测度植被稳定性。以生物量和种类组成作为稳定性的测度指标具有代表性，当植被处于结构和功能发生较大变化的不稳定状态时，必然在生物量与种类组成两方面上有所反映。

1.3.4 人工林稳定性

人工林最早出现在中欧，有 200 多年的发展历史，第二次世界大战以后，全世界人工林面积不断增加^[105]，截止到 1998 年，世界人工林的面积有 1.35 亿公顷。我国是世界上发展人工林最为突出的国家，人工林面积居世界首位，人工林的稳定性问题也受到林业工作者的高度重视^[106]。从世界环境与发展大会，特别是世界林业大会以来，林业的可持续发展和森林可持续经营问题成为各国发展林业的主题。人工林生态系统是森林生态系统的一种类型，人工林稳定的内涵既具有一般生态系统稳定性的共性又具有本身的

个性,人工林生态系统稳定性其实质是人工林的可持续性^[107]。

王豁然^[108]在论述外来树种人工林稳定性时强调林分的稳定性主要取决于遗传材料、立地环境、栽培措施三个方面的合理运用及互作效应。他认为是生态标准与指标、社会经济标准与指标、环境与美学价值标准与指标等作为其评价标准。盛炜彤^[109]提出了人工林不稳定性三个方面的表现:抵御异常气候变化能力弱、易遭病虫害攻击、易产生地力衰退。马兴洲^[110]通过运用刺槐的保存率、干梢率和林相不齐等稳定性的指标,通过逐步回归和数量化分析,对辽西刺槐人工林的稳定性进行了研究,认为土壤质地和坡位对刺槐人工林的稳定性起主导作用。

中国是一个植被覆盖率低、水土流失严重和荒漠化持续扩展的国家,为了实现国土绿化和生态环境改善,每年都在建立大量的人工植被,如何提高人工植被的稳定性和生产力是生态环境重建的需求热点。提高人工植被的稳定性应从以下几个方面考虑:根据植被地带性分布规律,以建立与当地环境条件特别是水热条件相适应的植被类型(乔木、灌木或草本)为目标植被;建立多物种的乔灌混交和针阔混交群落;控制放牧;保留林地的枯枝落叶层;选择抗逆性强和适应性好的物种;在干旱荒漠地区重视植被的合理配置方式,模拟天然植被的斑块格局;重视本地物种的选择和运用,按照阳性、中生、阴性树种的顺序依次栽植,促进群落自然演替,形成顶级稳定群落。

很多学者在研究人工林稳定性时都是根据所研究的具体对象来给出特定的稳定性指标。曾德慧等^[111]针对樟子松人工固沙林稳定性的研究,重新定义了人工林稳定性,他提出人工林稳定性的内涵为:在一个世代的时间跨度内,在一定立地条件下,一定大小面积的林分能够完成其生命周期,并提供相应的净初级生产量的能力。并且提出了评价其稳定性的标准:1、人工林能否顺利成活 2、能否正常生长 3、寿命的长短 4、对不良环境的抗御能力 5、林分结构是否合理 6、林分的生产力大小。

曹成有^[112]认为对固沙植物群落这一特定的群落来说,由于生境的极端恶劣,植物的侵入受到严格限制,因而种类不多,侵入种类的功能和特性与建群种基本相似,但对大气干旱的适应程度和抵抗能力有所差异。一年生植物在水分条件较好年份大量发生,但遇到干旱条件则数量较少,而多年生植物则相对较为稳定。因此,对同一人工固沙群落,通过对不同时期植物多样性的计算,可以反映群落稳定性的发展趋势。同时结合考虑群落中多年生植物的数量和结构,与天然群落进行对比研究也可以判断人工固沙群落的稳定状况。可见,物种多样性的恢复是判断沙地退化生态系统植被恢复程度有效的指标,可以很好地描述退化生态系统植被恢复和重建过程中群落的稳定性。

通过对热带生态系统特别是热带人工生态系统进行结构与功能的研究,结合国际上对该领域的研究进展,冯耀宗对人工生态系统稳定性概念及指标进行了探讨,他认为人工生态系统的稳定性是系统运动效率,抗性以及生物与非生物各要素间相互作用等系统平衡状况的综合特性。强调人工生态系统的稳定性应体现动态的、发展的、整体的、因子间相互联系的特点,并从以下几方面给出了人工生态系统稳定性评定的具体操作方法。即:系统生产力动态;系统抗干扰能力(生物量与生产力包括经济生产力、种群数量、

多样性指数在干扰前后的变化);系统环境动态(气候环境、土壤环境、环境污染程度)等作为评价人工生态系统稳定性的指标,根据这些指标进行打分,然后综合评定其稳定程度^[113]。

在现代生态学中,研究稳定性主要有两类基本的方法。第一种是用生物生态学的方法(纯经验性),通过真实的生态系统进行野外调查,并构造与生态系统特征相关的稳定性指标来研究,这种方法对稳定性概念的理解通常是指抵抗性或恒定性。第二种是用数学生态学的方法(数学模型),通过建立模型来反映真实生态系统的特征,这里的稳定性是指局域稳定性,如利用微分方程模型,食物网模型等,求出系统的平衡点来分析群落的稳定性^[114]。

1.4 本研究的目的意义

科尔沁沙地是我国重要的沙地之一,也是内蒙古自治区生态环境建设的重点区域,由于水土流失和荒漠化持续扩展,生态系统脆弱。防风固沙、恢复生态系统成为该地区造林的主要目标。研究小叶锦鸡儿、文冠果和踏郎等防风固沙林的不同发育阶段或不同立地类型的人工林稳定性问题就成为首要的问题。本研究以该地区主要的人工防风固沙林小叶锦鸡儿、文冠果和踏郎为例,系统研究种群地表土粒度、统计分析了其种群结构、群落物种多样性、立地质量,并进行了稳定性综合评价,为科尔沁沙地植被恢复和重建提供理论依据,对该区域改善生态功能和可持续发展具有重要指导意义,对于草原沙化地区植被建设,水土保持,以及提高草原沙化地区人民的收入都有着重要的指导作用。

2 研究区概况

2.1 地理位置

小叶锦鸡儿固沙林的实验地设在巴林右旗黄花林场；文冠果固沙林设在翁牛特旗经济林场；而踏郎固沙林则设在巴林右旗巴彦尔灯林场。巴林右旗位于赤峰市北部，地处大兴安岭东南缘，北与锡盟西乌珠穆沁旗交界，东与巴林左旗毗邻，西与林西县接壤，南与翁牛特旗隔西拉沐沦河相望，地理坐标为北纬 $43^{\circ} 12' 55''$ - $44^{\circ} 27' 52''$ ，东经 $118^{\circ} 12' 09''$ - $120^{\circ} 04' 42''$ ，总面积约 9638 km^2 ，地处著名的科尔沁沙地腹地。

文冠果研究区位于赤峰市翁牛特旗红山林场的固定沙地上，地理坐标为东经 $117^{\circ} 49' 48''$ - $120^{\circ} 45' 58''$ ，北纬 $42^{\circ} 27' 37''$ - $43^{\circ} 25' 31''$ 。在科尔沁沙地西部边缘区，属阴山山脉与大兴安岭南延接合部宜林丘陵区，坡向以阳坡为主，阴坡少，坡度多缓坡，坡位多中下坡，海拔高度 $600\text{--}730\text{m}$ ，为西辽河水系。地处温带半干旱大陆季风性气候，年均气温 5.9°C ，有效积温 $2800\text{--}3000^{\circ}\text{C}$ ，无霜期为 130d ，年降水量为 $300\text{--}330\text{mm}$ ，年蒸发量 2100mm ，植物生长期 130d 。土壤多属于沙壤土，土层瘠薄，有机质含量低，质地较疏松，土层厚度 320cm 左右，土壤以风沙土、草甸土和盐碱土为主，同时也有少量黑土。

2.2 地形地貌

巴林右旗境内总体呈现北高南低，由中山山地向丘陵倾斜冲积平原过渡的地貌特征，北部大兴安岭褶皱山地构成的中山山地地势较高，海拔在 1000m 左右，相对高度为 $700\text{--}1000\text{m}$ ，山系大体上呈东北—西南走向；中部低山丘陵区由较缓的丘陵、岗谷、沟谷构成，海拔在 $800\text{--}1000\text{m}$ ，相对高度在 $200\text{--}700\text{m}$ ；南部至东南部倾斜冲积平原主要由西拉沐沦河及查干沐沦河冲积而成，形成较平坦的沙砾河谷地，海拔 $400\text{--}500\text{m}$ ，在这一地区广泛分布着流动、半流动、半固定和固定沙丘，相对高度在 $5\text{--}20\text{m}$ 之间，属科尔沁沙地。

经济林场位于翁牛特旗中部，场部设在旗政府所在地-乌丹镇北 3 公里处，在科尔沁沙地西部边缘区，属阴山山脉与大兴安岭南延接合部宜林丘陵区，坡向以阳坡为主，阴坡少，坡度多缓坡，坡位多中下坡，海拔高度 $600\text{--}730\text{m}$ ，为西辽河水系。

2.3 气候特点

巴林右旗地理位置处于温带，属于半干旱大陆性季风气候，冬季寒冷而漫长，夏季炎热而短促，春秋季节气温变化剧烈。降水主要集中于夏季，并且经常遭受春旱。据大板气象站统计资料，年平均气温 4.9°C ，1 月平均气温 -13.7°C ，极端最低气温 -31.1°C 。7 月平均气温 22.2°C ，极端最高气温 38.7°C 。 $\geq 0^{\circ}\text{C}$ 积温 3207.3°C ， $\geq 5^{\circ}\text{C}$ 积温 3061.6°C ， $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 积温 2630.0°C 。无霜期 131d 。年平均降水量 350mm ，春季降水占全

年总降水量的 10%，夏季约占 75%，秋季占 12%，冬季只占全年的 3%。年蒸发量为 2103mm，全年蒸发量超过年降水量的 6 倍，干旱年份可达 10 倍以上。全年多为西、西北风，风势较大，年平均风速为 3.4m/s。全年大风日数平均为 60d 以上，最高年份达 106d，多集中在 4、5 月份，光照条件较好，太阳辐射总量为 5200-5400MJ/m²，生长季节（4-9 月）的总辐射量占全年总辐射的 65%。

翁牛特旗地处温带半干旱大陆季风性气候，年均气温 5.9℃，有效积温 2800-3000℃，无霜期为 130d，年降水量为 300-330mm，年蒸发量 2100mm，植物生长期 130d。土壤多属于沙壤土，土层瘠薄，有机质含量低，质地较疏松，土层厚度 320cm 左右，土壤以风沙土、草甸土和盐碱土为主，同时也有少量黑土^[115]。

2.4 水文特征

巴林右旗水资源较为丰富，全旗水资源总量 5.2 亿 m³，其中地上水资源 2.21 亿 m³，地下水补给量 2.99 亿 m³。境内有大小河流 26 条，多年平均径流量 10.94 亿 m³，其中：境内 2.21 亿 m³，境外 8.73 亿 m³，较大的河流有西拉沐沦河、查干沐沦河、嘎斯台河、古力古台河，此外还有哈通河、楼子河、翁根河、克德河等内陆河。全旗共有大小湖泊 42 个，水库 11 座，共有水面 5.08 万亩，具有很大的开发潜力，翁牛特旗相对水资源与巴林右旗相持平。

2.5 土壤类型与植被

试验地地处于大兴安岭山地与华北燕山山脉交接过渡地带，属半干旱型草原地区，地带性草原植物为大针茅和克氏针茅。而流动沙地上的植物种类少，先锋植物为沙米、沙竹等；在半固定沙地上植被有油蒿半灌丛、褐沙蒿半灌丛、差巴嘎蒿半灌丛和羊柴灌丛等；固定沙地上有榆树疏林、小叶锦鸡儿灌丛和沙地柏灌丛等。继先锋草本之后，沙地灌木、半灌木植被在沙地上通过天然落种或人工建植方式存活下来，它们群落结构比较稳定，有一定的抗外界干扰能力，逐渐成为建群种和优势种群。各种成土因素的明显的过渡特征，导致土壤类型与植被分布也呈出这样的特点，土壤类型主要有黑土、灰色森林土、棕壤土、栗钙土、草甸土、风沙土等。

2.6 土地利用状况

巴林右旗总土地面积 1531.65 万亩，其中：农业用地面积 91 万亩，占总面积的 5.9%；草场面积 965.41 万亩，占总面积的 63%；林业用地面积 436.39 万亩，占总面积的 28.5%；其它用地面积 38.85 万亩，占总面积的 2.5%。经济林场总经营面积 5.8 万亩，其中：国家重点公益林 36486 亩，商品林 7836 亩，未成林面积 8928 亩，宜林荒山荒地 2510 亩，非林业用地 2240 亩。

2.7 水土流失状况

日本侵略时期大量掠夺性开发森林资源，再加上近年来单纯追求农牧业生产，致使

大量的原生植被遭到破坏，昔日植被所剩无几，土壤失去保护。干旱多风和沙源丰富使土地开始沙漠化，加之人口急剧增加，盲目增加牲畜头数，草牧场退化，生态环境失去平衡，人民生活越来越贫困，直至发展到风沙侵袭农田、牧场、埋没房屋、村屯、阻断交通、严重威胁着广大农牧民的生产、生活。据统计每年造成的经济损失已达 500 多万元。

长期以来，巴林右旗和翁牛特旗在生态建设方面进行了不懈的努力，人力物力财力投入巨大，取得了初步成效，但经济建设与生态环境保护、自然资源合理利用的矛盾仍很突出，土地沙化、退化，水土流失仍很严重。2004 年赤峰市林业局提供的航测数据显示，巴林右旗沙化退化土地面积达 400.31 万亩，占全旗总面积的 32.7%，水土流失面积为 185.25 万亩，占耕地总面积的 46.3%，同时，还有明显沙化趋势的土地 162 万亩，如果保护不好很容易形成新的沙化。全旗 8 个苏木（乡镇）均有不同程度的沙化存在，而以查干沐沦河及西拉沐沦河沿岸最为严重，从 2005 年至今已治理沙化退化面积 96.33 万亩，仍旧有 304 万亩土地急需治理，从全旗整体情况来看，沙化面积在逐步减少，而治理难度却在逐步加大。而翁牛特旗水土流失面积为 116.48 万亩，占耕地总面积的 40.1%，整体上面呈新的沙化趋势，由于近些年降雨量下降，植被恢复生态条件明显较差，在一定程度上治理难度在加大，如不及时治理，水土流失面积将进一步加重。

3 研究方法

3.1 样地的选择与设置

选取黄花林场半固定沙地上不同龄级（6a、14a、20a、27a）人工林小叶锦鸡儿、经济林场（3a、18a、31a、44a）人工林文冠果和巴彦尔灯林场半流动沙地梁地上不同生境（坡上、坡中、坡下）条件下相对成熟 6a 人工林踏郎作为研究对象，同时选取立地质量相近的自然沙地作为对照，分别设置 20m×20m 的样地各 3 块，于 2008 年 6-8 月进行野外调查。

表 3-1 小叶锦鸡儿人工林样地状况

小叶锦鸡儿	株行距（m×m）	盖度（%）	保存率（%）	坡度（°）
6a	4×0.5	0.119	86.43	5
14a	4×0.5	0.232	79.36	6
20a	4×0.5	0.314	62.64	5
27a	4×0.5	0.325	46.35	4
自然沙地	—	—	—	5

表 3-2 文冠果人工林样地状况

文冠果	株行距（m×m）	盖度（%）	保存率（%）	坡度（°）
3a	4×2	0.108	92.49	4
18a	4×2	0.243	85.22	5
31a	4×2	0.321	72.38	3
44a	4×2	0.379	66.46	4
自然沙地	—	—	—	3

表 3-3 踏郎人工林样地状况

生境	株行距（m×m）	盖度（%）	保存率（%）	坡度（°）
坡上	4×2	14.7	72.64	25
坡中	4×2	12.8	79.36	18
坡下	4×2	31.4	82.43	15
自然沙地	—	—	—	20

3.2 样地地表土粒度特征统计方法

在以上每个样地内以 S 型设置 5 个取样点，用 GPS 进行野外定点，待读数稳定后，读出所示的经度、纬度和海拔高度，样品采集于各样点 0-5cm 表层。将野外带回的样品自然风干后，过筛滤取杂物，每个样品称取 50g，分别过 2、1、0.7、0.4、0.25mm 干筛，筛上剩余物移入电光纸称重，筛底物移入锥形瓶做脱钙，分散处理，采用吸管法分 3 组测定样品机械组成，最后取平均值。根据以上步骤对采样物进行测定，测得不同

粒径粒子的重量，结果全部用重量百分数表示，粒度参数采用统计计算（矩法计算）的方法^[116]。

3.3 种群结构统计

对样地内的人工林进行种群结构统计（小叶锦鸡儿高度每 20cm 为一个高度级、地径每 0.2cm 为一个径级；文冠果高度每 30cm 为一个高度级、地径每 1cm 为一个径级；踏郎高度每 20cm 为一个高度级、地径每 1.5cm 为一个径级），按样地统计每一高度（径）级的个体数量，统计出各物种人工林的高度（径）级结构；用米尺测量其高度、冠幅，采用游标卡尺测量其各株径级，同时统计株数及各种群中的年龄分布结构^[117,118]。

3.4 群落多样性测度的方法

在每个样地内 S 型选择 5 个 1 m×1 m 的草本样方，对物种组成、高度、幅、多度、盖度、频度、物候期、生活史等进行记录。根据样地资料，计算不同物种相对盖度、相对高度、相对频度；计算每一个样地不同物种的重要值（IV）；统计出同一发育阶段的不同样地各物种重要值平均值。以物种的重要值为基础，计算各物种（a）多样性指数，物种丰富度指数（S）、多样性指数（Simpson 指数 D；Shannon-wiener 指数 H'）和均匀度指数（Pielou 指数 JW；Alatalo 指数 Ea）。不同生境群落多样性计算同上，具体计算方法见文献^[119-126]。主要参数计算公式如下：

相对盖度=某个种的盖度/所有种盖度之和×100

相对高度=某个种的平均高度/所有种平均高度之和×100

相对频度=某一种的频度/全部种的频度之和×100

相对密度=种的密度/样方内所有种的密度×100

优势度=（相对盖度+相对频度+相对密度+相对高度）/4

草本 IV%=（相对盖度+相对高度+相对频度）/3

多样性指数：Simpson 指数： $D=1-\sum P_i^2$

Shannon-Wiener 指数： $H'=-\sum P_i \ln P_i$

均匀度指数：Pielou 均匀度指数： $J_w=(-\sum P_i \ln P_i) / \ln S = H' / \ln S$

Alatalo 均匀度指数： $E_a=[(\sum P_i^2)^{-1}-1]/[\exp(-\sum P_i \ln P_i)-1]$

3.5 土壤理化性质测定方法

3.5.1 土壤物理性质

每个样地内以 S 型设置 5 个取样点，每个样点挖取一个土壤剖面，调查土壤因子，记录土壤剖面特征，并进行机械分层，分别按照 0-10cm、10-20cm、20-30cm、30-40cm、40-50cm、50-60cm、60-70cm、70-80cm、80-90cm、90-100cm 的深度取样，每样 3 个重复，土壤含水率用烘干法测定^[127]。取样时间为 2008 年 6-7 月选择晴天。同时

在土壤剖面（0-20cm、20-40cm、40-60cm）保证不破坏土壤各层结构的前提下，用容量为 100cm^3 的环刀分层取原状土，每样 3 个重复，测定土壤物理性质（土壤容重、土壤饱和持水量、土壤毛管持水量、土壤田间持水量、毛管孔隙度、非毛管孔隙度和总孔隙度）^[128,129]。

3.5.2 土壤化学性质

每个样地内分别在土壤剖面 0-20cm、20-40cm、40-60cm 深处分层采集土样，重复 3 次。然后将样品集中起来，混合均匀放袋中带回室内风干并分析。采用国家林业行业标准《森林土壤分析方法》测定土壤养分含量，土壤 pH 值用电位法测定（水浸）；土壤有机质的测定采用油浴加热、重铬酸钾容量法（丘林法）；土壤水解 N 用碱解-扩散法；土壤速效磷用氟化铵-盐酸浸提、钼锑比色法测定；土壤速效钾用火焰光度计法；土壤全 N 量测定采用半微量开氏法、土壤全 P 量测定采用硫酸-高锰酸消解-钼锑抗比色法；土壤全 K 量测定采用氢氧化钠碱熔光度法^[130]。

3.6 M. Godron 稳定性测定方法

M. Godron 稳定性测定方法是法国生态学工作者从工业生产中发现并引入到植物生态学研究中的。它是由所研究的植物群落中所有种类的数量和这些种类的频度进行计算。首先把所研究群落中不同种植物的频度测定值按由大到小的顺序排列，并把植物的频度换算成相对频度，按相对频度由大到小的顺序逐步累积起来，然后将整个群落内植物种类的总和取倒数，按着植物种类排列的顺序也逐步累积起来，由对应的结果可以看出百分之多少的种类占有多大的累积相对频度。将植物种类百分数同累积相对频度一一对应，画出散点图，并将各点以一条平滑的曲线连接起来，在两个坐标轴的 100 处连一直线，与曲线的交点即为所求点。根据这种方法，种百分数与累积相对频度比值越接近 20/80 群落就越稳定，在 20/80 这一点上是群落的稳定点。本方法的理论基础参见文献^[131]

M. Godron 稳定性测定方法的缺陷是：在确定散点平滑曲线与直接的交点坐标时，要靠在方格纸上确定。1 是所得坐标可能不很准确，2 是该法不符合现代数据自动化处理的要求。因此，本文在绘制散点图及曲线平滑的过程中，首先建立数学模型，模拟散点图平滑曲线。

参数计算公式如下：

平滑曲线模拟模型为： $y = ax^2 + bx + c$

直线方程为： $y = 100 - x$

将（2）代入（1）得：

$$ax^2 + (b+1)x + c - 100 = 0$$

$$\text{得 } X \text{ 解为: } X = \frac{-(b+1) \pm \sqrt{(b+1)^2 - 4a(c-100)}}{2a}$$

方程有两个解，一个解远大于 100，另一个解应在 0-100 之间，根据研究情况，交

点 x 轴的坐标应大于 0 小于 100，所以应采用第 2 个解，这样可以客观地求出交点坐标，并可实现计算程序的自动化处理。

4 结果与分析

4.1 种群地表土粒度特征

土壤地表土粒度特征对土壤风蚀具有直接的影响作用，研究不同种群地表土粒度特征对了解不同尺度上土壤特性的空间异质性和土壤侵蚀、土壤利用变化及种群对土壤的影响程度和尺度具有重要的参考价值，同时也反映出在其土壤中生长的物种稳定性程度。

4.1.1 小叶锦鸡儿样地地表土粒度特征

从表 4-1 分析可知，小叶锦鸡儿不同龄级地表土粒度主要集中于沙粒段即（1-0.05mm）粒径段，含量在 87.06%-93.64%；其中粗砂粒（1-0.25mm）含量为 3.20%-22.74%；细砂粒（0.25-0.05mm）含量为 70.90%-83.86%。主要原因是对较小粒子起支配作用的是微粒内部的粘性力;对较大粒子是重力作用的增强，这两种力均对地表土壤的风蚀起沙起阻碍作用，而介于两者之间的粒子，则是空气动力起支配作用，因而更容易脱离地表^[132]据此，结合土壤粒度特征对不同种群龄级表土可风蚀性进行比较研究。从小叶锦鸡儿不同龄级地表土沙粒粒径分布特征可知，随着龄级的增加粗沙粒段即（1-0.25mm）粒径段逐渐上升，主要是由于种群恢复生态效果随着龄级增加而更佳，而细砂粒（0.25-0.05mm）逐渐下降，同时砂粒段即（1-0.05mm）粒径段所占比例逐渐升高趋势，在一定程度上自然沙地粗砂粒所占比例最少，原因正体现在地表没有更多植被，使得风速较大，多沉积很多流动细沙。

粒径平均值（Mz）2.24-3.35Φ，平均 2.758Φ；粒度标准差（SD）1.13-1.61Φ，分选中等-较差；粒度的偏态（SKI）3.064-4.218，为正偏态；峰度值（Kg）9.37-13.96 较尖。从整体粒径分析得出，小叶锦鸡儿种群不同龄级恢复地表粒径效果表现为：27a>20a>14a>6a>自然沙地。

表 4-1 不同发育阶段小叶锦鸡儿地表土粒度组成

取样 区域	粒度组成/mm									特征值			
	1~0.7	0.7 ~ 0.4	0.4 ~0.25	0.25 ~ 0.075	0.075 ~ 0.05	0.05 ~ 0.01	0.01 ~ 0.005	0.005 ~ 0.002	< 0.002	Mz/Φ	SD/Φ	SKI/Φ	Kg/Φ
6a	0.06	0.13	6.23	81.39	1.15	0.31	0.09	5.01	5.63	3.35	1.13	3.635	13.96
14a	0.09	0.34	9.41	80.18	0.78	0.28	0.07	4.13	4.72	2.49	1.36	3.247	9.37
20a	0.13	0.55	14.35	76.64	0.63	0.23	0.06	4.05	3.36	2.63	1.61	3.134	10.73
27a	0.16	0.69	21.89	70.39	0.51	0.21	0.04	2.94	3.17	2.24	1.34	3.064	11.76
自然 沙地	0.02	0.12	3.06	82.44	1.42	0.39	0.12	5.04	7.39	3.08	1.37	4.218	9.64

4.1.2 文冠果样地地表土粒度特征

从表 4-2 分析可知，从文冠果不同龄级地表土粒度主要集中于沙粒段即（1-0.05mm）粒径段，含量在 85.00%-91.59%；其中粗砂粒（1-0.25mm）含量为 4.28%-18.15%；细砂粒（0.25-0.05mm）含量为 69.11%-86.16%。从文冠果不同龄级地表土沙粒粒径分布统计可知，文冠果人工林不同龄级地表土粒度变化与小叶锦鸡儿很相似，随着龄级的增加粗沙粒段即（1-0.25mm）粒径段逐渐上升，主要是由于种群恢复生态效果随着龄级增加而更佳，而细砂粒（0.25-0.05mm）逐渐下降，同时砂粒段即（1-0.05mm）粒径段所占比例逐渐升高趋势，在一定程度上自然沙地粗砂粒所占比例最少，原因正体现在地表没有更多植被，使得风速较大，多沉积很多流动细沙。

粒径平均值（Mz）2.28-3.98Φ，平均 2.848Φ；粒度标准差（SD）1.27-1.65Φ，分选中等-较差；粒度的偏态（SKI）3.0112-3.892，为正偏态；峰度值（Kg）6.37-16.34 较尖。从整体粒径分析得出，文冠果种群不同龄级恢复地表粒径效果表现为：44a>33a>18a>5a>自然沙地。

表 4-2 不同发育阶段文冠果地表土粒度组成

取样区域	粒度组成/mm									特征值			
	1~0.7	0.7 ~ 0.4	0.4 ~ 0.25	0.25 ~ 0.075	0.075 ~ 0.05	0.05 ~ 0.01	0.01 ~ 0.005	0.005 ~ 0.002	< 0.002	Mz/Φ	SD/Φ	SKI/Φ	Kg/Φ
3a	0.04	0.15	5.98	84.19	1.23	0.09	0.08	3.32	4.92	3.02	1.35	3.892	14.32
18a	0.09	0.31	6.63	77.15	0.82	0.64	0.07	3.89	10.4	2.65	1.65	3.254	9.25
31a	0.15	0.49	10.45	74.74	0.67	0.48	0.06	3.76	9.2	2.28	1.32	3.155	12.18
44a	0.17	0.62	17.36	68.56	0.55	0.36	0.04	3.47	8.87	2.31	1.27	3.012	16.34
自然沙地	0.02	0.13	4.13	85.14	1.02	0.15	0.11	5.13	4.17	3.98	1.62	4.254	6.37

4.1.3 踏郎样地地表土粒度特征

从表 4-3 分析可知，踏郎不同生境地地表土粒度主要集中于沙粒段即（1-0.05mm）粒径段，含量在 81.06%-88.39%；其中粗砂粒（1-0.25mm）含量为 5.33%-15.77%；细砂粒（0.25-0.05mm）含量为 67.20%-83.06%。从踏郎不同生境地地表土沙粒粒径分布可以得出，按照破中、坡上和坡下的顺序，粗沙粒段即（1-0.25mm）粒径段逐渐上升，主要是由于种群恢复生态效果随着龄级增加而更佳，而细砂粒（0.25-0.05mm）逐渐下降，同时砂粒段即（1-0.05mm）粒径段所占比例逐渐升高趋势，在一定程度上自然沙地粗砂粒所占比例最少，因为踏郎种群受不同生境条件影响较大，在风力和坡度及沙粒重量等作用下，使得坡下种群地表土相对粗粒度沙段所占比例最大，这在一定的程度上正体现坡下种群对沙地表面土壤恢复效果最佳。同时也由于坡下地表生长植被较好，使得风速降低，能跟好地的保护地表沙粒不被吹走和，其他沙粒吹入，坡下更有利于植被生长。

粒径平均值（Mz）2.21-2.86Φ，平均 2.367Φ；粒度标准差（SD）1.21-1.78Φ，分

选中等-较差；粒度的偏态（SKI）3.021-4.024，为正偏态；峰度值（Kg）8.37-14.34 较尖。从整体粒径分析得出，踏郎种群不同生境条件下恢复地表粒径效果表现为：坡下>坡上>破中>自然沙地。

表 4-3 踏郎不同生境地表土粒度组成

取样区域	粒度组成/mm									特征值			
	1~0.7	0.7 ~ 0.4	0.4 ~ 0.25	0.25 ~ 0.075	0.075 ~ 0.05	0.05 ~ 0.01	0.01 ~ 0.005	0.005 ~ 0.002	< 0.002	Mz/Φ	SD/Φ	SKI/Φ	Kg/Φ
坡上	0.06	0.11	9.31	70.96	0.62	0.54	0.12	9.27	9.01	2.21	1.61	3.021	10.34
破中	0.04	0.08	7.54	79.36	0.91	0.78	0.19	4.48	6.62	2.03	1.38	3.106	8.38
坡下	0.09	0.35	15.33	66.65	0.55	0.46	0.09	7.41	9.07	2.37	1.21	3.231	14.34
自然沙地	0.03	0.06	5.24	82.04	1.02	0.83	0.26	4.02	6.5	2.86	1.78	4.024	8.37

4.1.4 三种不同种群样地地表土粒度特征规律

综合上述分析，可以较为清晰地看出，三种不同种群地表土粒度分化较明显，表现出一定的规律，即小叶锦鸡儿和文冠果随着龄级的增加表现出粗砂粒（1-0.25mm）所占比例逐渐上升，而细砂粒（0.25-0.05mm）出现下降趋势，同时可知沙粒段即（1-0.05mm）粒径段所占比例逐渐升高，而踏郎种群按照破中、坡上和坡下则同样也表现出这规律。即半固定沙地（小叶锦鸡儿、文冠果样地）最为粗化且分选较好，峰值较大，其次为半流动沙地（踏郎样地），表现出风蚀沙化的阶段性。

4.1.5 三种不同种群样地地表土粒度可蚀性颗粒的讨论

本文在对小叶锦鸡儿、文冠果和踏郎不同种群地表土粒度分布研究基础上，借助有关学者对可蚀性颗粒的研究，详细对其 3 种种群地表土可风蚀性颗粒进行研究讨论。史培军认为，土壤颗粒组成是决定土壤抗蚀性的重要因素，粒径 0.08-0.25mm 的土壤颗粒最容易遭受风蚀^[133]。董治宝和李振山通过风洞模拟实验发现：风成沙的风蚀可蚀性随粒度的变化服从分段函数，0.09mm 粒径最易被风蚀；风成沙颗粒可蚀性可以分为 3 种类型：>0.7mm 和<0.05mm 为难蚀颗粒，0.7-0.4mm、0.075-0.05mm 为较难蚀颗粒，0.4-0.075mm 为易蚀颗粒。在董治宝盒李振山风洞模拟实验中，粒级在 0.45-0.25mm 粒级段的起动风速 10.1-7.4m/s，而 0.25-0.075mm 粒级段的起动风速 5-7 m/s，本文结合研究区年平均风速及极端大风日数认为，0.25-0.075mm 比 0.4-0.025mm 粒级段为潜在可蚀性敏感的粒径段。同时有关实验表明，产生沙尘的地表物质以粉尘为主，其粒径直径多在 0.063-0.002mm^[134]。敏感粒径在易蚀粒径中所占比重可以直观地表物质的释放程度，因此把敏感粒径段物相对于易蚀颗粒物含量的多寡定位首要考虑的因素，把起尘颗粒（本次起尘颗粒粒径段以 0.075-0.002mm）的多寡定为辅助考虑因素。

由表 4-4 可知，不同龄级小叶锦鸡儿地表土敏感颗粒敏感粒径段占易蚀粒径段的相对值大小表现为：自然沙地>6a>14a>20a>27a。这在一定程度上体现出，自然沙地、6a 和 14a 龄级的小叶锦鸡儿地表土颗粒物释放较多，而 20a 和 27a 则相对较少，但各地由于受自然条件和各取样点活化时间及人为的影响强度等条件存在差异，所以表现有所差异，在一定程度上认为，该地区大范围的沙尘暴天气的尘源物主要来自自然沙地及栽植人工林的生长植被较少的低龄级林地表土颗粒。

表 4-4 不同发育阶段小叶锦鸡儿可蚀性粒级比较

采样区域	难蚀粒径 (>0.7mm 和 <0.05mm)	敏感粒径 (0.25~0.075m m)	易蚀粒径 (0.4~0.075m m)	起尘粒径 (0.063~0.002 mm)	敏感/易蚀 相对值
6a	5.32	90.44	96.19	1.03	0.940222
14a	7.39	84.64	94.28	1.27	0.897751
20a	6.66	79.31	87.06	1.49	0.910981
27a	7.34	62.55	80.31	1.32	0.778857
自然沙地	7.84	88.09	93.06	1.22	0.946594

由表 4-5 可知，不同龄级文冠果地表土敏感颗粒敏感粒径段占易蚀粒径段的相对值大小表现为：自然沙地>3a>18a>31a>44a。这在一定程度上体现出，自然沙地、3a 和 18a 龄级的文冠果地表土颗粒物释放较多，而 31a 和 44a 则相对较少，但各地由于受自然条件和各取样点活化时间及人为的影响强度等条件存在差异，所以表现有所差异，在一定程度上认为，该地区大范围的沙尘暴天气的尘源物主要来自自然沙地及栽植人工林的生长植被较少的低龄级林地表土颗粒。

表 4-5 不同发育阶段文冠果可蚀性粒级比较

采样区域	难蚀粒径 (>0.7mm 和 <0.05mm)	敏感粒径 (0.25~0.075m m)	易蚀粒径 (0.4~0.075m m)	起尘粒径 (0.063~0.002 mm)	敏感/易蚀 相对值
3a	5.58	91.32	97.3	1.37	0.938541
18a	8.37	85.23	92.86	1.39	0.917833
31a	6.83	76.74	86.06	1.45	0.891703

由表 4-6 可知，不同生境踏郎地表土敏感颗粒敏感粒径段占易蚀粒径段的相对值大小表现为：自然沙地>破中>坡上>坡下。这在一定程度上体现出，自然沙地、破中和坡上踏郎地表土颗粒物释放较多，坡下则相对较少，但各地由于受自然条件和各取样点活化时间及人为的影响强度等条件存在差异，所以表现有所差异，在一定程度上认为，该地区大范围的沙尘暴天气的尘源物主要来自自然沙地及生长在生境条件较差的人工林地表土颗粒。

表 4-6 踏郎不同生境可蚀性粒级比较

采样区域	难蚀粒径 (>0.7mm 和 <0.05mm)	敏感粒径 (0.25~0.075m m)	易蚀粒径 (0.4~0.075m m)	起尘粒径 (0.063~0.002 mm)	敏感/易蚀 相对值
------	-------------------------------	----------------------------	---------------------------	-----------------------------	--------------

	<0.05mm)	m)	m)	mm)	
坡上	8.44	86.34	93.21	1.34	0.926295
坡中	5.15	90.39	96.13	1.33	0.940289
坡下	9.32	63.84	77.66	1.03	0.822045
自然沙地	6.34	91.14	94.13	1.28	0.968235

4.2 人工固沙林种群结构变化研究

种群数量是指一定面积内某物种的个体总数。植物种群年龄结构是种群内部不同年龄的个体数量的分布情况，它预示着不同植物种群群体未来盛衰趋势；植物种群数量动态是植物个体生存能力与外界环境相互作用的结果，种群数量结构是种群的基本特征。种群的数量、年龄、密度、高度等特征都是种群结构要素，是从不同角度对种群状况的反映。在植物群落中，它预示着群落中不同种群的相互关系，如替代关系、依从关系、协同关系以及群落的稳定机制。结合种群的生态学和生物学特性，研究人工林种群年龄结构、径级结构不仅可以反映种群的现状，预测其未来，还可以展现植物种群与环境抗争的关系^[135,136]，特别是研究群落中建群种的种群数量动态对群落恢复、重建具有重要意义^[137,138]。

人工林稳定性的实质就是人工林的可持续发展，优势种群的发展趋势就是整个人工群落的发展趋势，优势种群可以更新就预示着整个人工群落可以更新。小叶锦鸡儿、文冠果和踏郎人工林在科尔沁沙地均为单优群落，其结构和功能如何，对整个人工群落演替和发展趋势起着至关重要的作用。群落更新、稳定主要依靠优势种群的发展和维持，因此，这三种防风固沙林的种群数量动态对整个群落的发展尤为重要。本研究通过对人工林种群的径级和高度结构分析，来探讨这三种防风固沙林种群是否稳定。

4.2.1 不同发育阶段小叶锦鸡儿种群结构变化

4.2.1.1 不同发育阶段小叶锦鸡儿种群径级结构

不同龄级小叶锦鸡儿固沙林的径级结构见图 4-1。在该地区不同龄级条件下小叶锦鸡儿种群的平均地径出现差异，种群平均个体地径： $27a>20a>14a>6a$ 。6a 的小叶锦鸡儿种群径级主要分布在 II-VII 径级，其中 V 径级最多，达到 12800 株/hm²，平均地径为 0.88cm；14a 的小叶锦鸡儿种群径级主要分布在 II-VII 径级，其中 V 径级最多，达到 10900 株/hm²，平均地径为 0.92cm；20a 的小叶锦鸡儿种群径级主要分布在 III、VIII 径级，其中 V 径级最多，达到 5600 株/hm²，平均地径为 1.22cm；27a 的小叶锦鸡儿种群径级主要分布在 IV-IX 径级，其中 VI、VII 径级最多，达到 10800 株/hm²，平均地径为 1.38cm。可以看出所处的龄级条件不同对人工林小叶锦鸡儿地径的影响很大。

从以上的情况可以看出，该地区的小叶锦鸡儿随着龄级的增加，当年生的幼苗数量减少，大径级的个体增多，中径级的个体占的比例较大，说明种群成衰退型。由于调查的时间为雨季，土壤含水量比较充足，所以幼苗的数量还是比较多，从这种情况可以看出，该地区小叶锦鸡儿的更新条件还是很好的，但是更新的幼苗在旱季能否成活成为小

叶锦鸡儿种群能否持续下去的关键条件。

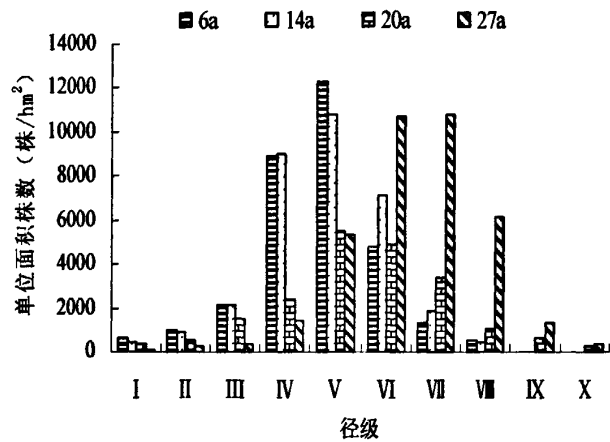


图 4-1 不同发育阶段小叶锦鸡儿种群径级结构

4.2.1.2 不同发育阶段小叶锦鸡儿种群高度级结构

由图 4-2 可以看出,在该地区不同龄级条件下小叶锦鸡儿种群的平均高度级出现差异,种群平均个体高度: 27a>20a>14a>6a。6a 的小叶锦鸡儿种群高度级主要分布在 II-VIII 级,其中 III 高度级最多,达到 5900 株/hm²,平均树高为 95.25cm; 14a 的小叶锦鸡儿种群高度级主要分布在 II-VII 级,其中 III 级最多,达到 12800 株/hm²,平均树高为 106.32cm; 20a 的小叶锦鸡儿种群高度级主要分布在 II-VIII 级,其中 VI 级最多,达到 4630 株/hm²,平均树高为 121.35cm; 27a 的小叶锦鸡儿种群高度级主要分布在 II-XI 级,其中 V 级最多,达到 8770 株/hm²,平均树高为 146.77cm。

由此可以看出,由于所处的龄级条件不同,致使人工林小叶锦鸡儿高度级分布明显不同,这在一定程度上能反映出不同龄级小叶锦鸡儿种群对土壤养分、水分、光照等条件产生影响,27a 小叶锦鸡儿的平均树高最大。以上可以得出,小叶锦鸡儿随着龄级的增加,大高度级的数量开始减少,中间高度级数量较多,更新幼苗数量逐渐减少,这说明种群呈衰退型,同时也反应出中间龄级的小叶锦鸡儿种群的稳定性较好,是小叶锦鸡儿生长较好的龄级。

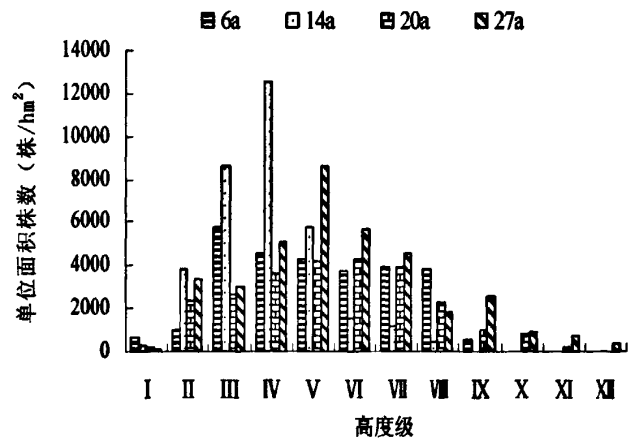


图 4-2 不同发育阶段小叶锦鸡儿种群高度级结构

4.2.1.3 不同发育阶段小叶锦鸡儿种群结构分析

通过分析科尔沁沙地不同发育阶段的小叶锦鸡儿种群的径级结构和高度结构,得出结论:在不同龄级发育阶段,小叶锦鸡儿人工固沙林的胸径和高度出现了严重的分化现象。随着年龄的增大,幼苗数量减少,大径级的个体增多,中径级的个体占的比例最大,同时也体现出中间龄级小叶锦鸡儿长势相对最好,种群稳定性较高,该地区的小叶锦鸡儿人工固沙林是一种衰退型的种群。

4.2.2 不同发育阶段文冠果种群结构变化

4.2.2.1 不同发育阶段文冠果种群径级结构

不同龄级文冠果固沙林的径级结构见图 4-3。在该地区不同龄级条件下文冠果种群的平均地径出现差异,种群平均个体地径: $44a > 31a > 18a > 3a$ 。3a 的文冠果种群径级主要分布在 I-II 径级,其中 I 径级最多,达到 $747 \text{ 株}/\text{hm}^2$,平均地径为 0.64cm ; 18a 的文冠果种群径级主要分布在 III-IX 径级,其中 VI 径级最多,达到 $257 \text{ 株}/\text{hm}^2$,平均地径为 5.42cm ; 31a 的文冠果种群径级主要分布在 III-X 径级,其中 VII 径级最多,达到 $278 \text{ 株}/\text{hm}^2$,平均地径为 7.22cm ; 44a 的文冠果种群径级主要分布在 IV-X 径级,其中 VII、VIII 径级较多,分别为 $166 \text{ 株}/\text{hm}^2$ 、 $184 \text{ 株}/\text{hm}^2$,平均地径分别为 7.38cm 、 8.46cm 。可以看出所处的龄级条件不同对人工林文冠果地径的影响很大。

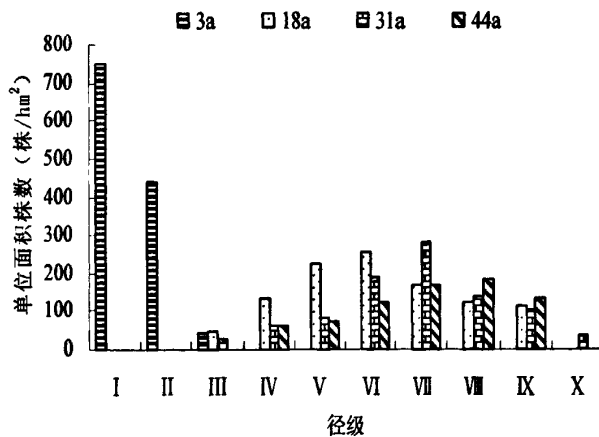


图 4-3 不同发育阶段文冠果种群径级结构

4.2.2.2 不同发育阶段文冠果种群高度级结构

由图 4-4 可以看出,在该地区不同龄级条件下文冠果种群的平均高度级出现差异,种群平均个体高度: $44a > 31a > 18a > 3a$ 。3a 的文冠果种群高度级主要分布在 I-IV 级,其中 II 高度级株数最多,达到 $894 \text{ 株}/\text{hm}^2$,平均树高为 52.45cm ; 18a 的文冠果种群高度级主要分布在 II-VII 级,其中 II 级最多,达到 $365 \text{ 株}/\text{hm}^2$,平均树高为 57.32cm ; 31a 的文冠果种群高度级主要分布在 IV-IX 级,其中 VII 级最多,达到 $262 \text{ 株}/\text{hm}^2$,平均树高为 66.32cm ; 44a 的文冠果种群高度级主要分布在 V-XII 级,其中 VIII 级最多,达到 298 株

/hm²，平均树高为 76.77cm。由此可以看出，由于所处的龄级条件不同，致使人工林文冠果高度级分布明显不同，这在一定程度上能反映出不同龄级文冠果种群对土壤养分、水分、光照等条件产生影响，44a 文冠果的平均树高最大。

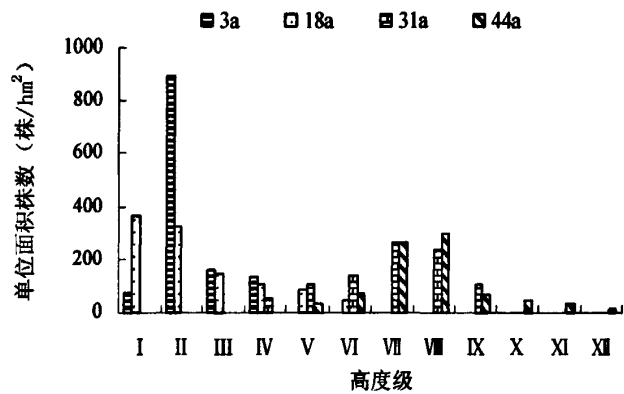


图 4-4 不同发育阶段文冠果种群高度级结构

4.2.2.3 不同发育阶段文冠果种群结构分析

通过分析科尔沁沙地不同发育阶段的文冠果种群的径级结构和高度结构，得出结论：在不同龄级发育阶段，文冠果人工固沙林的胸径和高度不同，出现了严重的分化现象。随着年龄的增大，幼苗数量几乎没有，大径级的个体增多，中径级的个体占的比例较多，同时也体现出中间龄级文冠果长势相对较好，种群稳定性逐渐增高，该地区的文冠果人工固沙林是一种嵌块体形式存在的，只有通过人为的抚育措施才能使种群更好的延续，自身更新很难，如果失去这种人为的干预，它将逐渐的衰退，而文冠果本身特性决定其维持时间较长，当地有至今还存活 290 多年的文冠果，而且长势很好。

4.2.3 不同生境踏郎种群结构变化

4.2.3.1 不同生境踏郎种群径级结构

不同生境条件下踏郎固沙林的径级结构见图 4-5。在该地区不同生境条件下踏郎种群的平均地径出现差异，种群平均个体地径：坡上>坡下>坡中。坡上的踏郎种群径级主要分布在 II-VII 径级，其中 III、IV 径级最多，达到 2750 株/hm²，平均地径为 5.23cm；坡下的踏郎种群径级主要分布在 II-VI 径级，其中 III 径级最多，达到 5600 株/hm²，平均地径为 4.59cm；坡中的踏郎种群径级主要分布在 II-V 径级，其中 III 径级最多，达到 4600 株/hm²，平均地径为 4.21cm。可以看出所处的生境条件不同对人工林踏郎地径的影响很大，而在水分条件好的情况下，稳定性会更好一些。

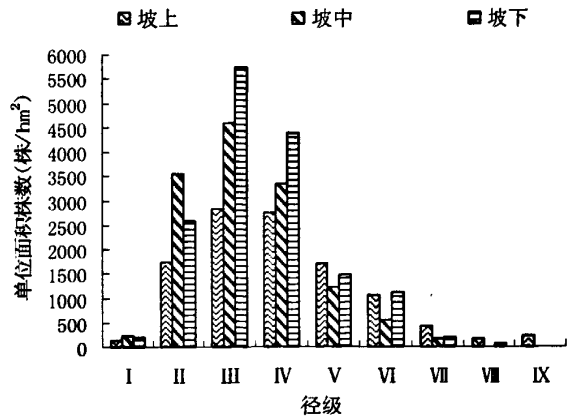


图 4-5 不同生境条件下踏郎种群径级结构

4.2.3.2 不同生境踏郎种群高度级结构

由图 4-6 可以看出，在该地区不同生境条件下踏郎种群的平均高度级出现差异，种群平均个体高度：坡下>坡上>坡中。坡下的踏郎种群高度级主要分布在Ⅱ-Ⅷ级，其中Ⅲ高度级最多，达到 4100 株/hm²，平均树高为 79.01cm；坡上的踏郎种群高度级分布在 I-Ⅷ级，其中Ⅳ级最多，达到 2300 株/hm²，平均树高为 69.40cm；坡中的踏郎种群高度级主要分布在Ⅱ-Ⅵ级，其中Ⅲ级最多，达到 3600 株/hm²，平均树高为 68.12cm。由此可以看出，由于所处的生境条件不同，导致土壤养分、水分、光照等条件产生差异，坡下踏郎的平均树高最大。

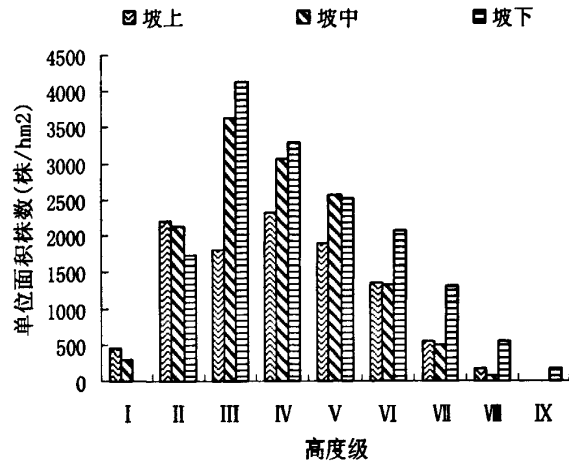


图 4-6 不同生境条件下踏郎种群高级结构

4.2.3.3 不同生境踏郎种群结构分析

通过分析科尔沁沙地不同生境踏郎种群的径级结构和高度结构得出结论：在不同生境条件下踏郎人工固沙林的胸径和高度不同，出现了明显的分化现象。由于所处的生境条件不同，导致水分、光照等条件产生差异，虽然是同龄级阶段的踏郎，但是地径和高度也出现了很大的差异：破中幼苗数量减少，大径级的个体增多，中径级的个体占有一定的数量，坡上的幼苗数量较少，中间径级数量较多，但大径级的占有数量相对破中较

多一些，稳定性相对要好于破中，而坡下的幼苗数量较多，中间径级数量比例较大，大径级数量也占有一定比例，坡下由于水分条件较好，长势很好，地径和高度都是最大的，这也说明踏郎在水分条件较好情况下，生长状况还是很好的，通过统计调查也知踏郎物种在水分条件较好情况下，自身的更新能力很强，幼苗所占的比例在一定程度上很大，种群稳定性很好，该地区的踏郎人工固沙林不用通过人为的抚育措施也能使种群更好的延续，自身更新很强，同时也出现自身存活时间不是很长，一般在 8 年左右开始进行人工更新，这样更有利于物种的更新，长势更佳。

4.2.4 三种防风固沙林种群结构变化对比研究

通过对科尔沁沙地不同发育阶段的小叶锦鸡儿和文冠果种群的数量动态分析，可以看出他们之间的异同点。文冠果人工固沙林种群在不抚育情况下属于衰退型种群；小叶锦鸡儿种群随着年龄的增长，幼苗的数量减少，大径级的个体数增多，中径级的个体占的比例最大，同时也体现出中间龄级小叶锦鸡儿长势相对最好，而在 27a 左右开始出现衰退；而文冠果由于树种的特性和沙地条件的限制几乎没有幼苗更新，这说明文冠果的萌蘖能力很差，所以在幼苗更新这方面小叶锦鸡儿要强于文冠果。由于科尔沁沙地温度、水分等条件的限制，小叶锦鸡儿的幼苗也在一定程度上难以长成成熟个体，这就需要人为的抚育措施。

踏郎是半流动沙地的防风固沙林在林分的质量和生产力方面较差于小叶锦鸡儿和文冠果，但是作为一种重要的固沙先锋植被，它发挥着很大的作用，在半流动沙地上，踏郎拥有极强的抗旱能力和萌蘖能力，这对于半流动沙地固沙林物种选择来说是最为重要因素。通过对不同生境条件下的踏郎地径和高度的研究，表明踏郎的稳定性受土壤坡度、水分、养分等的影响较大，在坡下的踏郎种群由于有较好的土壤水分、养分条件，长势较好，稳定性比较好，而坡上明显好于破中。这在一定程度上是由于土壤养分在重力作用下体现出重力流失带，同时由于水分条件的差异，在坡中养分、水分含量最差，坡下养分、水分含量高于坡上。出现这种现在的原因，半流动沙丘在主风力作用下，坡下坡度较缓且植株密集受表面风力影响较弱，而坡中由于空气动力学及风沙物理学原理^[139]不仅受主风力的影响同时还受到坡上部分气体涡流作用，使得坡中沙地表面风速较大，进而导致沙地表面更干燥。而坡上不断有沙粒沉积，使得表面的水分得以保护，地表层水分蒸发速率减少。

4.3 人工防风固沙林物种多样性研究

4.3.1 不同发育阶段小叶锦鸡儿人工林物种多样性研究

4.3.1.1 小叶锦鸡儿不同发育阶段植物种类组成变化

不同龄级小叶锦鸡儿人工林地被层物种重要值见表 4-7。6a 的小叶锦鸡儿人工林地被层主要物种有：冰草（*Agropyron cristatum Gaertn*）、沙引草（*Messerschmidia rosmarinifolia Willd ex Roemet Schult*）、草地早熟禾（*Poa pratensis L*）等 9 个物种。其中

冰草的重要值最大, 为 25.42; 沙引草次之, 重要值为 15.43; 草地早熟禾重要值为 15.11。从表中可以看出 6a 小叶锦鸡儿人工固沙林地被层各个种的优势程度, 这些植物分布在萝藦科、大戟科、菊科、禾本科、豆科、紫草科 6 个科; 杠柳属、大戟属、蒲公英属、早熟禾属、苜蓿属、针茅属、沙引草属、百花蒿属、冰草属 9 个属。

14a 的小叶锦鸡儿人工林地被层主要物种有: 草地早熟禾、冰草、地锦草 (*Euphorbia humifusa* Willd) 等 11 个物种。其中草地早熟禾的重要值最大, 为 16.29; 冰草次之, 重要值为 13.33; 地锦草重要值为 12.64。这些植物分布在杠柳科、大戟科、马齿苋科、禾本科、豆科、百禾科、伞形科、藜科、紫草科 9 个科; 杠柳属、大戟属、马齿苋属、早熟禾属、胡枝子属、苜蓿属、葱属、沙蓬属、沙引草属、阿魏属、冰草属 11 个属。与 6a 生小叶锦鸡儿相比其中蒲公英 (*Herba Taraxaci*)、蒙古针茅 (*Stipa mongolorum* Tzvel) 和百花蒿 (*Stilpnolepis centiflora* Krasch) 3 种物种都没有出现, 但出现了马齿苋 (*Portulaca oleracea* Linn)、兴安胡枝子 (*Lespedeza*)、碱葱 (*Allium polyrhizum* Turcz)、沙米 (*Agriophyllum squarrosum* (Linn) Moq)、沙茴香 (*Ferula bungeana* Kitag) 5 种物种。

20a 的小叶锦鸡儿人工林地被层主要物种有: 冰草、地锦草、草地早熟禾等 16 个物种。其中冰草的重要值最大, 为 20.83; 地锦草次之, 重要值为 10.11; 草地早熟禾重要值为 8.41。这些植物分布在萝藦科、大戟科、马齿苋科、禾本科、藜科、豆科、百禾科、伞形科、紫草科、菊科 10 个科; 杠柳属、大戟属、马齿苋属、早熟禾属、猪毛菜属、胡枝子属、苜蓿属、葱属、防风属、针茅属、沙蓬属、藜属、沙引草属、阿魏属、百花蒿属和冰草属 16 个属。与 14a 生小叶锦鸡儿相比出现了猪毛菜、防风、蒙古针茅、灰菜和百花蒿 5 种物种。20a 生小叶锦鸡儿物种最多, 主要是因为该种群下的土壤养分、水分、光照等条件明显好于其他龄级小叶锦鸡儿, 这些植被多为一、二年生的植物, 且具有很强的耐旱、耐热及更新能力, 该龄级小叶锦鸡儿对土壤立地质量及种群恢复生态有明显作用, 此龄级种群生长势极佳, 能较好稳定持续生长, 能更好地恢复生态。

27a 的小叶锦鸡儿人工林地被层主要物种有: 冰草、草地早熟禾、灰菜 (*Chenopodium album*) 等 13 个物种。其中冰草的重要值最大, 为 29.33; 草地早熟禾次之, 重要值为 11.88; 灰菜重要值为 9.34。这些植物分布在萝藦科、大戟科、菊科、禾本科、藜科、豆科、伞形科、紫草科 8 个科; 杠柳属、大戟属、蒲公英属、早熟禾属、猪毛菜属、胡枝子属、苜蓿属、防风属、针茅属、藜属、沙引草属、阿魏属、冰草属 13 个属。与 20a 生小叶锦鸡儿相比其中马齿苋、猪毛菜、碱葱和百花蒿 4 种物种没有出现, 但出现了蒲公英 1 种物种。

自然沙地的小叶锦鸡儿人工林地被层主要物种有: 冰草、沙米、地锦草等 6 个物种。其中冰草的重要值最大, 为 22.49, 沙米次之, 重要值为 19.42; 地锦草重要值为 18.02。这些植被分布在萝藦科、大戟科、苜蓿科、禾本科、豆科、藜科 6 个科; 杠柳属、大戟属、早熟禾属、苜蓿属、沙蓬属和冰草属 6 个属。由于自然沙地土壤养分、水

分等生长条件很差，各物种的平均重要值相对较大，样地草本物种多样性则较少。

从以上的分析可以看出从自然沙地到发育 27a 的小叶锦鸡儿人工固沙林地被草本层物种在组成和数量上的变化，在造林最初的低龄级时间里，由于种群生长条件较差，草本植被较少，随着发育时间的推移，林内环境逐渐得到改善，一些新的物种侵入，物种逐渐增多，物种间的竞争，群落物种重要值分配逐步趋于均匀。20a 种群中的物种最多，达到 16 种，而 27a 种群只有 13 种，这在一定程度上体现出 27a 种群对生态环境的恢复效果明显不如 20a，从上面小叶锦鸡儿种群结构分析可知，27a 小叶锦鸡儿种群中的大径级占的比例较多，而高度上较高的占有比例较少，而 20a 的小叶锦鸡儿种群中大径级占的比例较少，而大部分高度级分布在中高度级，说明其种群还有很大的生长空间，同时也由于 27a 小叶锦鸡儿种群多数树木生长较大，地下根系分布较多且较深，吸收水分较多，导致地下水位较低，造成地表含水量更低，使得一些耐旱性差的草本不能生存而退出该群落。

表 4-7 不同发育阶段小叶锦鸡儿人工林地被层物种重要值 (VI%)

植物名称	6a	14a	20a	27a	自然沙地
北五加皮	6.26	7.66	6.62	8.37	16.32
地锦草	10.32	12.64	10.11	7.33	18.02
马齿苋	—	8.54	4.26	—	—
蒲公英	3.27	—	—	1.39	—
草地早熟禾	15.11	16.29	8.41	11.88	14.64
猪毛菜	—	—	3.24	—	—
兴安胡枝子	—	5.31	4.13	4.07	—
紫花苜蓿	3.42	5.48	3.84	3.64	9.11
碱葱	—	3.19	2.22	—	—
防风	—	—	5.19	3.96	—
蒙古针茅	8.23	—	3.31	5.30	—
沙米	—	12.47	4.87	2.25	19.42
灰菜	—	—	5.34	9.34	—
沙引草	15.43	4.45	3.64	5.48	—
沙茴香	—	10.64	5.66	7.66	—
百花蒿	12.54	—	8.33	—	—
冰草	25.42	13.33	20.83	29.33	22.49

4.3.1.2 不同发育阶段小叶锦鸡儿人工林群落地被层多样性特征

表 4-8 是不同发育阶段小叶锦鸡儿人工固沙林地被层物种多样性的特征，从表中可以看出，物种丰富度在发育 20a 的小叶锦鸡儿群落最大，27a 和 14a 的小叶锦鸡儿群落次之，发育 6a 和自然沙地的小叶锦鸡儿群落最小。发育 6a 的小叶锦鸡儿人工林物种丰富度较小，是由于造林初期对林下植被的人为干扰导致的物种数较少。随着发育时间的增长，林内环境改善，一些新的物种入侵，所以从发育 6a 到发育 27a 的小叶锦鸡儿人

工林，物种丰富度整体波动性增高。

小叶锦鸡儿人工固沙林不同发育阶段物种多样性指数随发育时间的增长波动性升高。发育 20a 的小叶锦鸡儿群落 Simpson 多样性指数最高，为 0.59；发育 6a 的小黑杨群落 Simpson 多样性指数较低，为 0.34；自然沙地物种多样性指数最低，为 0.29。另一种多样性指数 Shannon 多样性指数最高值也出现在发育 20a 的小黑杨群落中，为 1.97；发育 6a 的小叶锦鸡儿群落多样性指数较低，为 0.87；自然沙地物种多样性指数最低，为 0.67。这说明科尔沁沙地小叶锦鸡儿人工固沙林的发育过程中，林下地被层的物种也是逐步趋于复杂，多样性逐步增高的，但整体 20a 种群物种多样性最佳。

小叶锦鸡儿人工固沙林不同发育阶段物种均匀度指数随发育时间的增长波动性升高。Pielou 均匀度指数从 6a 的 0.52 到 27a 的 0.59，最大值出现在 20a，为 0.64，而自然沙地为 0.36；Alatalo 均匀度指数从 0.43 增加到 20a 的 0.73 后又将到 27a 的 0.62，自然沙地为 0.33。由此可见，随着小叶锦鸡儿的生长，地被层植物物种是一个早期优势种不断消退，后期侵入种和均匀性逐渐增长、稳定性逐渐发展的过程，整体 20a 稳定效果较强。

由以上的结果表明，在科尔沁沙地地区小叶锦鸡儿人工固沙林的丰富度及多样性指数随时间的推移呈上升后又下降趋势。除了前一个生长阶段接近自然沙地，其余各个指数均远高于自然沙地。这说明该地区由于种植小叶锦鸡儿人工林，使沙地表面植被的组成和数量发生了很大的变化，随着小叶锦鸡儿种群的生长，林分郁闭度增大，物种多样性增强，部分先锋物种退出群落，新的物种入侵，导致小叶锦鸡儿人工林种群林下植物物种趋于复杂和稳定，分布趋于均匀，多样性增高。小叶锦鸡儿人工林在发育 20a 的时候，物种丰富度达到最大，多样性指数和均匀度指数综合起来比其他阶段有优势，表明发育 20a 的小叶锦鸡儿人工林种群结构、组成相对更合理，是生长发育最佳年龄，对保持水土流失和恢复生态环境效果最佳。

表 4-8 不同发育阶段小叶锦鸡儿人工林群落植物物种多样性指数

多样性指数	6a	14a	20a	27a	自然沙地
物种丰富度 S	9	11	16	13	6
Simpson 多样性指数 D	0.34	0.49	0.59	0.54	0.29
Shannon 多样性指数 H'	0.87	1.12	1.97	1.35	0.67
Pielou 均匀度指数 Jw	0.52	0.54	0.64	0.59	0.36
Alatalo 均匀度指数 Ea	0.43	0.57	0.73	0.62	0.33

4.3.2 不同发育阶段文冠果人工林物种多样性研究

4.3.2.1 文冠果不同发育阶段植物种类组成变化

不同龄级文冠果人工林地被层物种重要值见表 4-9。3a 的文冠果人工林地被层主要物种有：冰草（*Agropyron cristatum Gaertn*）、沙引草（*Messerschmidia rosmarinifolia Willdex Roemet Schult*）、地锦草（*Euphorbia humifusa Willd*）等 6 个物种。其中冰草的重

要值最大, 为 25.51; 沙引草次之, 重要值为 17.93; 地锦草重要值为 17.01。从表中可以看出 3a 文冠果人工固沙林地被层各个种的优势程度, 这些植物分布在大戟科、禾本科、藜科、紫草科、菊科 5 个科; 大戟属、早熟禾属、沙蓬属、沙引草属、百花蒿属、冰草属 6 个属。

18a 的文冠果人工林地被层主要物种有: 沙米 (*Agriophyllum squarrosum* (Linn) Moq)、草地早熟禾 (*Poa pratensis* L)、冰草等 8 个物种。其中沙米的重要值最大, 为 18.47; 草地早熟禾次之, 重要值为 18.17; 冰草重要值为 15.11。这些植物分布在大戟科、马齿苋科、禾本科、豆科、藜科、紫草科、伞形科、7 个科; 大戟属、马齿苋属、早熟禾属、胡枝子属、苜蓿属、沙蓬属、沙引草属、阿魏属、冰草属 9 个属。与 3a 生文冠果相比其中百花蒿 (*Stilpnolepis centiflora* Krasch) 物种没有出现, 但出现了马齿苋 (*Portulaca oleracea* Linn)、兴安胡枝子 (*Lespedeza*)、沙茴香 (*Ferula bungeana* Kitag) 3 种物种。

31a 的文冠果人工林地被层主要物种有: 冰草、草地早熟禾、沙米等 10 个物种。其中冰草的重要值最大, 为 15.33; 草地早熟禾次之, 重要值为 14.83; 沙米重要值为 13.49。这些植物分布在大戟科、禾本科、豆科、伞形科、藜科、紫草科、6 个科; 大戟属、早熟禾属、胡枝子属、防风属、针茅属、沙蓬属、藜属、沙引草属、阿魏属、冰草属 10 个属。与 18a 生文冠果相比其中马齿苋物种没有出现, 但出现了防风 (*Saposhnikovia divaricata*)、蒙古针茅 (*Stipa mongolorum* Tzvel) 和灰菜 (*Chenopodium album*) 3 种物种。

44a 的文冠果人工林地被层主要物种有: 冰草、沙米、地锦草等 12 个物种。其中冰草的重要值最大, 为 20.38; 沙米次之, 重要值为 10.33; 地锦草重要值为 10.24。这些植物分布在大戟科、马齿苋科、禾本科、豆科、伞形科、藜科、紫草科、菊科、8 个科; 大戟属、马齿苋属、早熟禾属、胡枝子属、防风属、针茅属、沙蓬属、藜属、沙引草属、阿魏属、百花蒿属和冰草属 12 个属。与 31a 生文冠果相比其中出现了马齿苋和百花蒿 2 种物种。44a 生文冠果物种最多, 主要是因为该种群下的土壤养分、水分、光照等条件明显好于其他龄级文冠果, 这些植被多为一、二年生的植物, 且具有很强的耐旱、耐热及更新能力, 该龄级文冠果对土壤立地质量及种群恢复生态有明显作用。

自然沙地的文冠果人工林地被层主要物种有: 冰草、沙米、地锦草等 4 个物种。其中冰草的重要值最大, 为 29.49, 沙米次之, 重要值为 26.37; 地锦草重要值为 24.75。这些植被分布在大戟科、禾本科、藜科 3 个科; 大戟属、早熟禾属、沙蓬属和冰草属 4 个属。由于自然沙地土壤养分、水分等生长条件很差, 各物种的平均重要值相对较大, 样地草本物种多样性则较少。

从以上的分析可以看出从自然沙地到发育 44a 的文冠果人工固沙林地被草本层物种在组成和数量上的变化, 在造林最初的低龄级时间里, 由于种群生长条件较差, 草本植被较少, 随着发育时间的推移, 林内环境逐渐改善, 一些新的物种侵入, 物种逐渐增多, 由于物种间的竞争, 群落物种重要值分配逐步趋于均匀。

表 4-9 不同发育阶段文冠果人工林地被层物种重要值 (VI%)

植物名称	3a	18a	31a	44a	自然沙地
地锦草	17.01	13.41	9.58	10.24	24.75
马齿苋	—	7.53	—	5.37	—
草地早熟禾	14.37	18.17	14.83	9.76	19.39
兴安胡枝子	—	8.31	7.04	5.29	—
防风	—	—	5.76	4.13	—
蒙古针茅	—	—	6.85	6.64	—
沙米	13.64	18.47	13.49	10.33	26.37
灰菜	—	—	10.98	6.49	—
沙引草	17.93	6.36	8.48	5.55	—
沙茴香	—	12.64	7.66	7.57	—
百花蒿	11.54	—	—	8.25	—
冰草	25.51	15.11	15.33	20.38	29.49

4.3.2.2 不同发育阶段文冠果人工林群落地被层多样性特征

表 4-10 是不同发育阶段文冠果人工固沙林地被层物种多样性的特征，从表中可以看出，物种丰富度在发育 44a 的文冠果群落最大，31a 和 18a 的文冠果群落次之，发育 3a 和自然沙地的文冠果群落物种丰富度很小。发育 3a 的文冠果人工林物种丰富度较小，是由于造林初期对林下植被的人为干扰导致的物种数较少。随着发育时间的增长，林内环境改善，一些新的物种入侵，所以从发育 3a 到发育 44a 的文冠果人工林，物种丰富度是逐步增高的。

文冠果人工固沙林不同发育阶段物种多样性指数随发育时间的增长波动性升高。发育 44a 的文冠果群落 Simpson 多样性指数最高，为 0.48；发育 3a 的文冠果群落 Simpson 多样性指数较低，为 0.23；自然沙地物种多样性指数最低，为 0.22。另一种多样性指数 Shannon 多样性指数最高值也出现在发育 44a 的文冠果群落中，为 1.27；发育 3a 的文冠果群落多样性指数较低，为 0.52；自然沙地物种多样性指数最低，为 0.51。这说明科尔沁沙地文冠果人工固沙林的发育过程中，林下地被层的物种也是逐步趋于复杂，多样性逐步增高的。

文冠果人工固沙林不同发育阶段物种均匀度指数随发育时间的增长波动性增长。Pielou 均匀度指数从 3a 的 0.45 到 44a 的 0.67，而自然沙地为 0.37；Alatalo 均匀度指数从 0.42 增加到 0.76，自然沙地为 0.32。由此可见，随着文冠果的生长，地被层植物物种是一个早期优势种不断消退，后期侵入种和均匀性逐渐增长、稳定性逐渐发展的过程。

由以上的结果表明，在科尔沁沙地地区文冠果人工固沙林的丰富度及多样性指数随时间的推移呈上升趋势。除了前一个生长阶段接近自然沙地，其余各个指数均远高于自然沙地。这说明该地区由于种植文冠果人工林，使沙地表面植被的组成和数量发生了很大的变化，随着文冠果种群的介入，并随着文冠果的生长，林分郁闭度增大，物种多样性增强，部分先锋物种退出群落，新的物种入侵，导致文冠果人工林种群林下植物物种

趋于复杂和稳定，分布趋于均匀，多样性增高。文冠果人工林在发育 44a 的时候，物种丰富度达到最大，多样性指数和均匀度指数综合起来比其他阶段有优势，表明发育 44a 的文冠果人工林种群结构、组成相对更合理。

由表 4-10 可以看出，不同龄级条件下文冠果人工林群落的物种丰富度是 44a>31a>18a>3a。44a 人工林文冠果群落物种丰富度最大，达到 12 种，自然沙地群落丰富度最少为 4 种。不同龄级的文冠果群落物种多样性指数和均匀度指数出现明显差异：44a>31a>18a>3a。

表 4-10 不同发育阶段文冠果人工林群落植物物种多样性指数

多样性指数	3a	18a	31a	44a	自然沙地
物种丰富度 S	6	8	10	12	4
Simpson 多样性指数 D	0.23	0.37	0.41	0.48	0.22
Shannon 多样性指数 H'	0.52	1.01	1.08	1.27	0.51
Pielou 均匀度指数 Jw	0.45	0.51	0.56	0.67	0.37
Alatalo 均匀度指数 Ea	0.42	0.55	0.68	0.76	0.32

4.3.3 不同生境踏郎人工林物种多样性研究

4.3.3.1 不同生境植物种类组成变化

不同生境踏郎人工林地被层物种重要值见表 4-11。坡上的踏郎人工林地被层主要物种有：北五加皮（*Periplola sepium Bge*）、地锦草（*Euphorbia humifusa Willd*）、冰草（*Agropyron cristatum Gaertn*）、等 6 个物种。其中冰草的重要值最大，为 32.73，这些植物分布在萝藦科、大戟科、禾本科、紫草科、伞形科 5 个科；杠柳属、大戟属、早熟禾属、沙引草属、阿魏属、冰草属 6 个属。

坡中的踏郎人工林地被层主要物种有：北五加皮、百花蒿（*Stilpnolepis centiflora Krasch*）、冰草等 5 个物种。其中冰草的重要值最大，为 32.61，这些植被分布在萝藦科、大戟科、禾本科、菊科、4 个科；杠柳属、大戟属、藜属、百花蒿属、冰草属 5 个属。与坡上相比其中沙引草（*Messerschmidia rosmarinifolia Willd.ex Roem.et Schult*）和沙茴香（*Ferula bungeana Kitag*）两个物种都没有出现，但出现了百花蒿物种。

坡下的踏郎人工林地被层主要物种有：北五加皮、沙茴香、百花蒿等 8 个物种。其中冰草的重要值最大，为 30.65；地锦草次之，重要值为 16.35，这些植被分布在萝藦科、大戟科、禾本科、藜属、紫草科、伞形科、菊科科 7 个科；杠柳属、大戟属、早熟禾属、藜属、沙引草属、阿魏属、百花蒿属、冰草属 8 个属。其中禾本科有两个物种，其它各科分别只有一个物种。坡下物种最多，主要是因为坡下的土壤养分、水分、光照等条件明显好于坡上和坡中，这些植被多为一、二年生的植物，且具有很强的耐旱、耐热及更新能力。

自然沙地地被层主要物种有：北五加皮、地锦草、冰草等 4 个物种。其中冰草的重要值最大，为 38.69，这些植被分布在萝藦科、大戟科、禾本科 3 个科；杠柳属、大戟

属、早熟禾属、冰草属 4 个属。由于自然沙地土壤养分、水分等生长条件很差，各物种的平均重要值相对较大，样地草本优势度则较低。

由以上的结果表明，在半流动沙地上不同生境条件下生长的踏郎人工固沙林的丰富度及多样性指数呈波动趋势。在一定程度上体现出同龄级中坡下生长效果最佳，坡上明显好于破中，各项指数均高于自然沙地。这说明该地区由于种植踏郎人工林，使沙地表面植被的组成和数量发生了很大的变化，随着踏郎种群的介入，并随着踏郎的生长，林分郁闭度增大，物种多样性增强，部分先锋物种退出群落，新的物种入侵。坡下物种最多，主要是因为坡下的土壤养分、水分、光照等条件明显好于坡上和坡中，这些植被多为一、二年生的植物，且具有很强的耐旱、耐热及更新能力，坡下植物物种趋于复杂和稳定，分布趋于均匀，多样性增强。

表 4-11 不同生境踏郎人工林地被层物种重要值 (VI%)

植物名称	坡上	坡中	坡下	自然沙地
北五加皮	8.62	8.26	12.67	17.78
地锦草	25.34	23.54	16.35	21.22
草地早熟禾	18.22	18.38	11.46	22.31
灰菜	—	—	5.78	—
沙引草	6.45	—	9.48	—
沙茴香	8.64	—	5.63	—
百花蒿	—	17.21	7.98	—
冰草	32.73	32.61	30.65	38.69

4.3.3.2 不同生境踏郎人工林群落地被层多样性特征

表 4-12 是不同生境踏郎人工固沙林地被层物种多样性的特征，从表中可以看出，坡下物种丰富度最大，破中物种丰富度最差，坡上明显好于破中，坡下的土壤养分、水分、光照等条件明显较好，在一定程度上使得踏郎种群生长较适宜，而破中由于空气动力学及风沙物理学原理不仅受主风力的影响，同时还受到坡上部分气体涡流作用，使得坡中沙地表面风速较大，进而导致沙地表面更干燥，导致破中立地条件较差，对踏郎生长不利，而坡上不断有沙粒沉积，使得表面的水分得以保护，地表层水分蒸发速率减少，坡上立地条件明显好于破中，因此可知，由于生境条件不同导致坡下物种丰富度最大，破中最小，坡上居中。

踏郎人工固沙林不同生境物种多样性指数出现波动性变化。坡下的踏郎群落 Simpson 多样性指数最高，为 0.58；破中群落 Simpson 多样性指数较低，为 0.42；自然沙地物种多样性指数最低，为 0.29。另一种多样性指数 Shannon 多样性指数最高值也出现在坡下群落中，为 1.35；坡中踏郎群落多样性指数较低，为 0.97；自然沙地物种多样性指数最低，为 0.67。这说明科尔沁沙地踏郎人工固沙林的发育过程中，林下地被层的物种多样性受生境条件影响较大。

踏郎人工固沙林不同生境物种均匀度指数发生波动性变化。Pielou 均匀度指数按照

坡上、破中和坡下的顺序，从坡上的 Pielou 均匀度指数 0.61，降到破中的 Pielou 均匀度指数 0.56，然后又增加到坡下的 Pielou 均匀度指数 0.74，而自然沙地 Pielou 均匀度指数最低为 0.36；Alatalo 均匀度指数从坡上的 0.52，降到破中的 0.48，然后又增加到坡下的 0.64，自然沙地 Alatalo 均匀度指数最低为 0.32。

由以上的结果表明，在科尔沁沙地地区踏郎人工固沙林的丰富度及多样性指数在不同生境条件下有着波动性变化趋势，总体上体现：坡下>坡上>坡中>自然沙地，这说明该地区由于种植踏郎人工林，使沙地表面植被的组成和数量发生了很大的变化，随着踏郎种群的介入，并随着踏郎自身的生长，更新能力很强，林分郁闭度增大，物种多样性增强，部分先锋物种退出群落，新的物种入侵，使得踏郎人工林种群林下植物物种趋于复杂和稳定，物种多样性增高，这一点在坡下体现的更为明显。

由表 4-12 可以看出，不同生境条件下踏郎人工林群落的物种丰富度：坡下>坡上>坡中>自然沙地。坡下物种丰富度最大，达到 8 种，自然沙地的群落丰富度最少为 4 种。不同生境的踏郎群落物种多样性指数和均匀度指数出现明显差异：坡下>坡上>坡中>自然沙地。

表 4-12 不同生境踏郎人工林群落植物物种多样性指数

多样性指数	坡上	坡中	坡下	自然沙地
物种丰富度 S	6	5	8	4
Simpson 多样性指数 D	0.48	0.42	0.58	0.29
Shannon 多样性指数 H'	1.06	0.97	1.35	0.67
Pielou 均匀度指数 Jw	0.61	0.56	0.74	0.36
Alatalo 均匀度指数 Ea	0.52	0.48	0.64	0.32

4.3.4 三种人工林防风固沙林物种多样性对比研究

由以上的研究结果表明：科尔沁沙地地区的小叶锦鸡儿人工固沙林和文冠果人工固沙林随发育时间的增长，群落的物种丰富度和多样性指数都呈上升趋势，并且都要远高于自然沙地。这说明在科尔沁沙地种植小叶锦鸡儿和文冠果人工固沙林取得了一定的效果，由于人工固沙林的介入，形成了森林生态环境，随着时间的推移，林内环境逐渐改善，新的物种入侵，使人工固沙林群落内的林下植物物种趋于复杂，分布趋于均匀，物种多样性提高。相比较而言，小叶锦鸡儿人工固沙林群落的丰富度和多样性要高于文冠果人工固沙林，对植被的恢复情况比较好的。踏郎人工固沙林在沙丘上的固沙效果是比较好的，与小叶锦鸡儿和文冠果人工固沙林相比，在物种的丰富度和多样性上要差一些，但在生境条件比较好的坡下等位置的踏郎对植被的恢复情况还是比较好的，这也与踏郎物种本身的性质有关，在自身更新上有很大的优势，同时耐旱性很强。

4.4 人工防风固沙林立地质量变化研究

4.4.1 不同发育阶段小叶锦鸡儿立地质量研究

4.4.1.1 小叶锦鸡儿人工林土壤水分

图 4-7 是不同龄级小叶锦鸡儿人工林土壤含水量的垂直分布。不同龄级小叶锦鸡儿人工林土壤含水量呈现明显差异。土壤深度为 0cm-30cm 时,小叶锦鸡儿人工林(除自然沙地)随着土壤深度的增加含水量出现先增加后减少趋势,主要由于表面枯落物较少,沙地表面温度较高,含水量较低,而自然沙地表面植被多为一、二年生,根系分部在此层,含水量明显下降后增加;在 40cm-60cm 土层中,小叶锦鸡儿人工林(除自然沙地)土壤含水量先减少后增加,是由于小叶锦鸡儿根茎生长深度一般为 40cm-60cm 范围内,导致吸水量较大,自然沙地地表植被根系分布在该层内较少,含水量较高;70cm-100cm 土层中,小叶锦鸡儿土壤含水量出现波动式变化,整体上(除 14a 和自然沙地)含水量降低。自然沙地整体土壤含水量均小于小叶锦鸡儿人工林土壤含水量,这主要是由于自然沙地的植被郁闭度很小,地表植被多为一、二生,土壤中根系较少且分布较浅。从图中还可看出, 14a 人工林和自然沙地的土壤含水量在 80cm 深度以下有所上升,6a、20a、27a 小叶锦鸡儿人工林的土壤含水量则逐渐下降,这主要是由于地上植被生长不同。总体来看,不同龄级小叶锦鸡儿人工林 20a 土壤平均含水量最高,水分条件比较好,对小叶锦鸡儿的生长更有利,而 27a 小叶锦鸡儿含水量要明显下降,主要因为地下根系较发达,且分布较深,地上部分种群生长需要水分较多,在一定程度上使得地下水位降低,含水量明细不足。

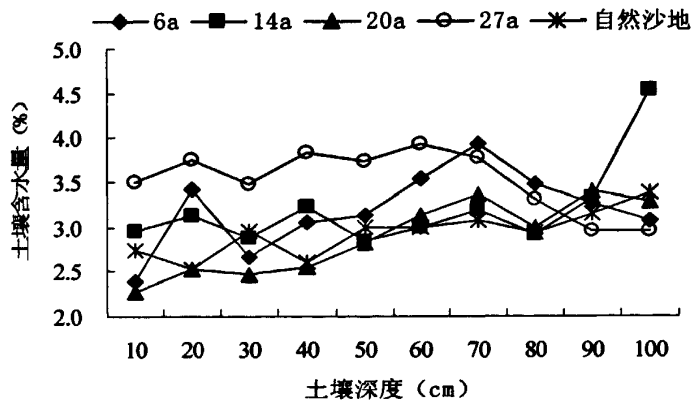


图 4-7 不同发育阶段小叶锦鸡儿人工林土壤含水量垂直分布

4.4.1.2 小叶锦鸡儿土壤物理性质

由表 4-13 可以看出不同龄级条件下小叶锦鸡儿人工林土壤物理性质存在差异, 27a 小叶锦鸡儿人工林土壤物理条件均相对较好, 0cm-60cm 土壤中各项物理指标分别为: 平均容重 1.599g/cm^3 、平均土壤饱和含水量 22.37%、平均毛管持水量 20.38%、平均田间持水量 18.59%、非毛管孔隙度 2.68%、毛管孔隙度 32.7%、总孔隙度 35.38%。这主

要是由于不同龄级人工林生物量、枯落物的多少以及分解程度不同，同时对土壤立地质量改良程度不同，所以 27a 小叶锦鸡儿人工林土壤疏松，孔隙度较大。

从以上的分析可以看出通过在科尔沁沙地种植小叶锦鸡儿人工固沙林，林地产生枯枝落叶并且分解使土壤有机质增加，同时植株根系数量也逐渐增多，这样就改善了土壤的物理性状，使人工林地表层土壤变得疏松，另外由于林分的郁闭和林下植被的覆盖，使得土壤侵蚀得到了一定的控制，避免了雨水冲刷而导致土壤板结，有利于雨水的下渗。

表 4-13 不同发育阶段小叶锦鸡儿人工林土壤养分垂直分布

龄级	土层 (cm)	容重 (g/cm ³)	土壤饱和含 水量 (%)	毛管持水量 (%)	田间持水量 (%)	非毛管孔隙 度 (%)	毛管孔隙度 (%)	总孔隙度 (%)
6a	0-20	1.543	19.75	18.14	16.43	2.03	29.70	31.73
	21-40	1.581	20.99	18.72	16.08	2.13	28.10	30.23
	41-60	1.674	21.45	18.59	16.09	2.75	27.77	30.52
14a	0-20	1.576	21.14	19.33	17.20	1.90	30.60	32.50
	21-40	1.559	21.65	19.37	17.95	2.00	31.27	33.27
	41-60	1.625	21.85	20.46	18.01	2.17	32.03	34.2
20a	0-20	1.589	21.53	19.93	17.43	2.15	32.76	34.91
	21-40	1.565	22.15	20.22	17.81	2.57	32.80	35.37
	41-60	1.573	22.25	20.80	18.22	2.67	32.54	35.21
27a	0-20	1.588	22.21	20.03	18.43	2.20	31.76	33.96
	21-40	1.625	22.35	20.32	18.51	2.87	32.80	35.67
	41-60	1.663	22.55	20.80	18.82	2.97	33.54	36.51
自然 沙地	0-20	1.459	19.39	17.07	15.49	2.20	29.83	32.03
	21-40	1.522	20.83	17.45	15.82	2.30	29.52	31.82
	41-60	1.533	21.28	18.88	16.08	2.31	30.65	32.96

4.4.1.3 小叶锦鸡儿土壤化学性质

表 4-14 是不同发育阶段小叶锦鸡儿人工林及自然沙地土壤养分空间垂直分布的特征。从中可以得出，随着小叶锦鸡儿人工林发育时间的增长，小叶锦鸡儿人工林从 6a 到 27a 大部分土壤肥力指标呈波动性增加后又减小趋势，土壤有机质平均含量从 6a 的小叶锦鸡儿 0.71%开始逐渐增加，27a 的小叶锦鸡儿达到最大，为 1.15%，其自然沙地有机质平均值最小，为 0.64%，这在一定程度上反映出，随着龄级的增长，土壤立地质量有着很大的改善，为植被的生长提供了有利的条件；而土壤平均 pH 值从 6a 的最大值 7.91 降到 27a 生小叶锦鸡儿最小 7.34，自然沙地值为 8.21，这也体现土壤近中性，为植被生长提供有利龄级条件；土壤中的水解 N 和速效 K 平均含量最大值分别出现在小叶锦鸡儿 6a 和 27a，平均值分别为 49.7 mg/kg 和 45.7 mg/kg，自然沙地平均值分别为 22.66mg/kg 和 54.9mg/kg；而速效 P 平均含量则从 6a 的 3.32 mg/kg 增加到 27a 的 5.07 mg/kg，自然沙地值最小为 3.11 mg/kg；土壤全 N、全 P 和全 K 的平均值都是随着龄级的增加而逐渐增大，其最大含量值分别为：0.059%、0.033%和 0.544%，其自然沙地值均为最小。这是由于小叶锦鸡儿人工林不同的龄级导致人工林的生物量、枯落物及其分解程度不同，同时小叶锦鸡儿根系明显起到更好改良土壤化学性质的作用。从中可以看出，速效 K 平均含量最小值出现在 27a 生小叶锦鸡儿土壤中，这是因为 27a 小叶锦鸡儿植被生长较好，对土壤中速效养分含量有较大的影响，已吸收利用土壤中的交换性钾和

水解性钾较多,则剩余速效 K 含量较低;而 27a 生小叶锦鸡儿水解 N 平均含量最大,因为 27a 小叶锦鸡儿植被长势趋于稳定状态,土壤中含水量也较高,大多数植被根系在该层中能较好地加速土壤中无机态氮和部分有机质中易分解的、比较简单的有机态氮的释放,使得土壤水解 N 平均含量较高。氮素是森林植物最重要的营养元素之一,土壤全氮量是土壤中含有的有机态氮和无机态氮的总和。测定全氮量既可以帮助我们了解土壤氮素的贮量水平的高低,也是计数碳氮比 (C/N) 的基础,而 C/N 能反映土壤有机质分解的难易程度,而土壤中的全 P 和全 K 含量直接能反映出土壤的肥力,对生产实践具有指导价值,以上数据得出小叶锦鸡儿人工林不同龄级对土壤化学性质的改良作用总体表现为: 27a>20a>14a>6a。

表 4-14 不同发育阶段小叶锦鸡儿人工林土壤化学性质

龄级	土层 (cm)	pH 值	有机质 (%)	水解 N (mg/kg)	速效 P (mg/kg)	速效 K (mg/kg)	全 N (%)	全 P (%)	全 K (%)
6a	0-20	7.82	0.66	28.67	3.27	43.34	0.023	0.009	0.463
	21-40	8.12	0.71	22.17	3.46	48.31	0.029	0.008	0.512
	41-60	7.79	0.77	31.83	3.23	45.45	0.027	0.008	0.507
14a	0-20	7.78	0.81	31.15	3.81	40.67	0.043	0.012	0.512
	21-40	7.11	0.83	42.90	4.02	41.18	0.045	0.012	0.544
	41-60	7.93	0.91	33.20	4.14	42.89	0.038	0.010	0.487
20a	0-20	7.71	0.87	38.04	4.38	39.81	0.052	0.032	0.534
	21-40	7.68	0.99	42.67	4.51	39.67	0.058	0.028	0.554
	41-60	7.56	1.05	44.67	4.21	32.42	0.054	0.029	0.519
27a	0-20	7.43	1.02	47.53	5.02	31.22	0.059	0.033	0.565
	21-40	7.36	1.12	45.01	5.11	36.53	0.062	0.031	0.523
	41-60	7.22	1.31	56.57	5.08	37.69	0.057	0.036	0.543
自然 沙地	0-20	7.98	0.57	22.01	3.13	54.67	0.024	0.013	0.441
	21-40	8.28	0.67	24.61	3.34	58.67	0.032	0.007	0.437
	41-60	8.37	0.68	21.36	2.87	51.46	0.021	0.011	0.476

4.4.2 不同发育阶段文冠果立地质量研究

4.4.2.1 文冠果人工林土壤水分

图 4-8 是不同龄级文冠果人工林土壤含水量的垂直分布。不同龄级文冠果人工林土壤含水量呈现明显差异。土壤深度为 0cm-30cm 时,文冠果人工林(除 3a 文冠果)随着土壤深度的增加含水量逐渐增加,主要由于表面枯落物较少,沙地表面温度较高,含水量较低,而 3a 文冠果地表面植被多为一、二年生,根系分部在此层,含水量明显下降后增加;在 40cm-70cm 土层中,文冠果人工林 18a、31a 和 44a 变化趋势基本一致,总体土壤含水量先减少后增加,是由于该龄级文冠果主根茎生长深度一般在该土层范围内,导致吸水量较大,自然沙地地表植被根系分布在该层内较少,含水量较高,而 3a 文冠果出现波动式变化,因为分布在该土层中的根系极少;70cm-100cm 土层中,文冠果土壤含水量整体上(除 3a 文冠果)出现先增加后减少趋势,而 3a 文冠果整体土壤含水量先下降后出现平稳趋势,这主要是由于 3a 文冠果种群的植被郁闭度很小,地表植被多为一、二生,土壤中根系较少且分布较浅。总体来看,不同龄级文冠果人工林 44a 土壤平均含水量最高,水分条件比较好,对文冠果的生长更有利。

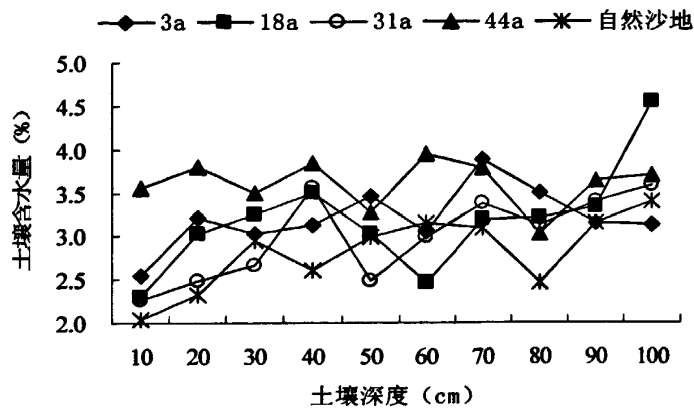


图 4-8 不同发育阶段文冠果人工林土壤含水量垂直分布

4.4.2.2 文冠果土壤物理性质

由表 4-15 可以看出不同龄级条件下文冠果人工林土壤物理性质存在差异，44a 文冠果人工林土壤物理条件均相对较好，0cm-60cm 土壤中各项物理指标分别为：平均容重 1.615g/cm³、平均土壤饱和含水量 22.37%、平均毛管持水量 20.17%、平均田间持水量 18.81%、非毛管孔隙度 2.54%、毛管孔隙度 32.52%、总孔隙度 35.06%。这主要是由于不同龄级人工林生物量、枯落物的多少以及分解程度不同，同时对土壤立地质量改良程度不同，所以 44a 文冠果人工林土壤疏松，孔隙度较大。

从以上的分析可以看出通过在科尔沁沙地种植文冠果人工固沙林，林地产生枯枝落叶并且分解使土壤有机质增加，同时植株根系数量也逐渐增多，这样就改善了土壤的物理性状，使人工林地表层土壤变得疏松，另外由于林分的郁闭和林下植被的覆盖，使得土壤侵蚀得到了一定的控制，避免了雨水冲刷而导致土壤板结，有利于雨水的下渗。

表 4-15 不同发育阶段文冠果人工林土壤物理性质

龄级	土层 (cm)	容重 (g/cm ³)	土壤饱和含水量 (%)	毛管持水量 (%)	田间持水量 (%)	非毛管孔隙度 (%)	毛管孔隙度 (%)	总孔隙度 (%)
3a	0-20	1.453	19.12	18.64	16.89	2.01	29.74	31.75
	21-40	1.515	20.03	18.98	16.65	2.28	28.02	30.30
	41-60	1.631	21.35	18.66	16.21	2.52	28.37	30.89
18a	0-20	1.589	20.11	19.37	17.48	1.91	30.54	32.45
	21-40	1.565	21.48	19.56	17.86	2.05	31.61	33.66
	41-60	1.631	21.69	20.18	18.03	2.19	32.13	34.32
31a	0-20	1.598	21.39	19.78	17.43	2.02	32.23	34.25
	21-40	1.573	22.23	20.62	17.98	2.52	32.48	35.00
	41-60	1.551	22.30	20.63	18.42	2.61	32.34	34.95
44a	0-20	1.584	22.08	19.89	18.55	2.18	31.57	33.75
	21-40	1.613	22.15	20.01	18.79	2.64	32.84	35.48
	41-60	1.647	22.87	20.45	19.08	2.79	33.16	35.95
自然沙地	0-20	1.461	19.02	18.07	15.94	2.03	29.63	31.66
	21-40	1.526	20.03	18.45	16.32	2.11	29.45	31.56
	41-60	1.603	20.41	18.49	16.58	2.22	30.62	32.84

4.4.2.3 文冠果土壤化学性质

表 4-16 是不同发育阶段文冠果人工林及自然沙地土壤养分空间垂直分布的特征。

从中可以得出，随着文冠果人工林发育时间的增长，文冠果人工林从 3a 到 44a 大部分土壤肥力指标呈增加趋势，土壤有机质平均含量从 3a 的文冠果 0.64%开始逐渐增加，44a 的文冠果达到最大，为 1.18%，3a 的文冠果平均土壤有机质为 0.64%，而其自然沙地有机质平均值最小，为 0.57%，这在一定程度上反映出，随着龄级的增长，土壤立地质量有着很大的改善，为植被的生长提供了有利的条件；而土壤平均 pH 值从 3a 的最大值 7.94 降到 44a 生文冠果最小 7.36，自然沙地值为 8.14，这也体现土壤近中性，为植被生长提供有利龄级条件；速效 K 和水解 N 平均含量最大值为别出现在文冠果 3a 和 44a，平均值分别为 47.45 mg/kg 和 53.93mg/kg，自然沙地平均值分别为 56.58 mg/kg 和 22.57 mg/kg。从中可以看出，速效 K 平均含量最小值出现在 44a 生文冠果土壤中，这是因为 44a 文冠果植被生长较好，对土壤中速效养分含量有较大的影响，已吸收利用土壤中的交换性钾和水解性钾较多，则剩余速效 K 含量较低；而 44a 生文冠果水解 N 平均含量最大，因为 44a 文冠果植被长势趋于稳定状态，土壤中含水量也较高，大多数植被根系在该层中能较好地加速土壤中无机态氮和部分有机质中易分解的、比较简单的有机态氮的释放，使得土壤水解 N 平均含量较高。而土壤速效 P 平均含量则出现在从 3a 的 3.37 mg/kg 增加到 44a 的 5.09 mg/kg，自然沙地值最小为 3.27 mg/kg；土壤全 N、全 P 和全 K 的平均值都是随着龄级的增加而逐渐增大，最大含量分别为：0.056%、0.034% 和 0.501%，其自然沙地值均为最小。这是由于文冠果人工林不同的龄级导致人工林的生物量、枯落物及其分解程度不同，随着文冠果龄级的增加，群落环境得到了明显的改善，同时文冠果根系明显起到更好改良土壤化学性质的作用，加之对土壤物理性质的改良作用，导致含水量不同等，因此 44a 文冠果群落植被生长最好，该种群对植被恢复生态作用最大，自然沙地生长改良作用最差。以上数据得出文冠果人工林不同龄级对土壤化学性质的改良作用总体表现为：44a>31a>18a>3a。

表 4-16 不同发育阶段文冠果人工林土壤养分垂直分布

龄级	土层 (cm)	pH 值	有机质 (%)	水解 N (mg/kg)	速效 P (mg/kg)	速效 K (mg/kg)	全 N (%)	全 P (%)	全 K (%)
3a	0-20	7.83	0.52	27.32	3.43	46.42	0.029	0.011	0.402
	21-40	8.04	0.72	26.19	3.28	48.11	0.026	0.008	0.418
	41-60	7.94	0.68	30.43	3.40	47.83	0.028	0.010	0.476
18a	0-20	7.77	0.71	36.05	3.981	40.88	0.033	0.014	0.495
	21-40	7.69	0.84	38.96	4.06	41.29	0.042	0.012	0.504
	41-60	7.97	0.73	37.22	4.11	42.03	0.037	0.011	0.483
31a	0-20	7.69	0.84	41.03	4.33	39.21	0.046	0.023	0.498
	21-40	7.61	0.95	42.61	4.12	39.34	0.052	0.025	0.487
	41-60	7.46	1.07	43.88	4.09	38.97	0.053	0.029	0.519
44a	0-20	7.38	1.08	56.29	5.06	37.02	0.055	0.034	0.525
	21-40	7.43	1.34	52.97	5.13	36.55	0.063	0.031	0.549
	41-60	7.27	1.12	52.53	5.09	37.48	0.051	0.038	0.543
自然 沙地	0-20	7.99	0.45	22.06	3.22	56.39	0.024	0.009	0.401
	21-40	8.14	0.63	24.32	3.33	58.31	0.019	0.007	0.437
	41-60	8.30	0.64	21.34	3.27	55.03	0.020	0.011	0.422

4.4.3 不同生境踏郎人工林立地质量研究

4.4.3.1 踏郎人工林土壤水分

图 4-9 是不同生境条件下踏郎人工林土壤含水量的垂直分布。不同生境的踏郎人工林含水量由于坡位不同而呈现出明显的差异。土壤深度为 0cm-30cm 时，坡上、坡中和坡下随着土壤深度的增加含水量出现先增加后减少；在土壤深度 0cm-60cm 范围内，坡上、坡中和坡下的土壤含水量出现先降低后上升的波动，这是由于踏郎根茎生长深度一般 40cm-60cm 范围内。而自然沙地土壤含水量在 0cm-30cm 深处逐渐增加，在 40cm 深处减少后又开始增加，70cm 深处土壤含水量最大，随后逐渐减少，这主要是由于自然沙地的郁闭度很小。从图中还可看出，坡中和坡下的土壤含水量在 80cm 深度以下有所上升，坡上和自然沙地的土壤含水量则逐渐下降，这主要是由于坡位造成的水势面不同。总体来看，坡下的踏郎人工林土壤平均含水量最高,水分条件比较好，对踏郎的生长更有利。

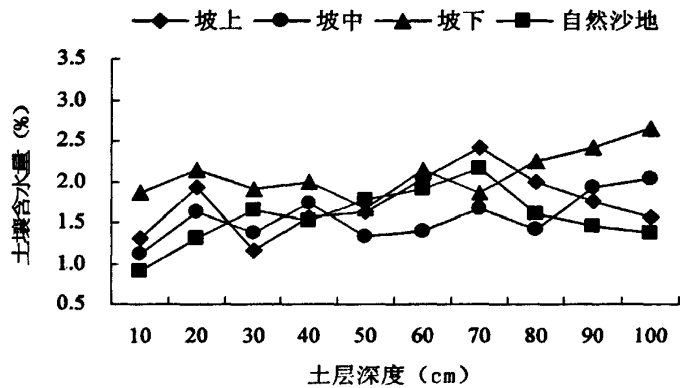


图 4-9 不同生境踏郎人工林土壤含水量垂直分布

4.4.3.2 踏郎人工林土壤物理性质

由表 4-17 可以看出不同生境条件下踏郎人工林土壤物理性质存在差异，坡下的踏郎人工林土壤物理条件相对较好。这主要是由于生境不同导致人工林生物量、枯落物的多少以及分解程度不同，同时坡上、坡中的土壤表层有机质等营养物质冲刷到坡下，使得坡下的踏郎人工林土壤疏松，孔隙度增大等。

表 4-17 不同生境踏郎人工林土壤物理性质

生境	土层 (cm)	容重 (g/cm³)	土壤饱和含水量 (%)	毛管持水量 (%)	田间持水量 (%)	非毛管孔隙度 (%)	毛管孔隙度 (%)	总孔隙度 (%)
坡上	0-20	1.643	19.75	18.14	15.43	2.63	29.70	32.33
	21-40	1.681	17.99	16.72	14.08	2.13	28.10	30.23
	40-60	1.674	18.45	16.59	14.09	3.10	27.77	30.87
坡中	0-20	1.576	22.54	21.33	18.20	1.90	33.60	35.50
	21-40	1.559	22.65	21.37	18.95	2.00	33.27	35.27
	41-60	1.565	21.85	20.46	18.01	2.17	32.03	34.20
坡下	0-20	1.588	21.41	20.03	17.43	2.20	31.76	33.96
	21-40	1.565	22.15	20.32	17.51	2.87	31.80	34.67
	41-60	1.563	22.25	20.80	17.82	2.27	32.54	34.81
自然沙地	0-20	1.669	20.39	19.07	16.49	2.20	31.83	34.03
	21-40	1.672	20.83	19.45	16.82	2.30	32.52	34.82
	41-60	1.643	21.28	19.88	17.08	2.31	32.65	34.95

4.4.3.3 踏郎人工林土壤化学性质

踏郎根部主要分布在 40-60cm 土层深处, 由表 4-18 可以看出坡下 40-60cm 土壤深度 pH 值为 6.96, 为踏郎生长提供了适宜的土壤环境。坡下土壤全 N 含量大于自然沙地而小于坡上和坡中, 主要是由于大部分根部吸收利用, 而使全 N 含量明显低, 而有机质、水解 N、速效 P、速效 K、全 P 和全 K 的含量均明显高于坡上, 坡中和自然沙地, 从土壤化学性质上可以总体看出, 踏郎坡上总体明显要好于坡中, 这在一定程度上是由于土壤养分在重力作用下体现出重力流失带, 同时由于水分条件的差异, 在坡中养分、水分含量最差, 坡下养分、水分含量高于坡上。出现这种现在的原因, 半流动沙丘在主风力作用下, 坡下坡度较缓且植株密集受表面风力影响较弱, 而坡中由于空气动力学及风沙物理学原理, 不仅受主风力的影响同时还受到坡上部分气体涡流作用, 使得坡中沙地表面风速较大, 进而导致沙地表面更干燥。而坡上不断有沙粒沉积, 使得表面的水分得以保护, 地表层水分蒸发速率减少, 同时不同的生境导致人工林的生物量、枯落物及其分解程度不同, 因而对土壤的化学性质的影响也不同。坡上、坡中土壤表层的有机质等营养物质被冲刷到坡下, 且部分矿质元素受重力影响流失, 使得坡下踏郎人工林土壤养分含量较高, 总体上呈现出: 坡下>坡上>坡中>自然沙地。

表 4-18 不同生境踏郎人工林土壤养分垂直分布

生境	土层 (cm)	pH 值	有机质 (%)	水解 N (mg/kg)	速效 P (mg/kg)	速效 K (mg/kg)	全 N (%)	全 P (%)	全 K (%)
坡上	0-20	6.74	0.35	20.40	3.36	46.67	0.051	0.023	0.263
	21-40	6.82	0.33	22.05	3.71	50.02	0.044	0.025	0.212
	40-60	6.87	0.38	15.75	4.03	51.24	0.055	0.018	0.244
坡中	0-20	7.04	0.28	12.92	4.69	44.33	0.031	0.011	0.312
	21-40	6.99	0.24	15.75	3.63	43.33	0.033	0.014	0.243
	41-60	7.11	0.22	20.42	3.97	46.67	0.033	0.016	0.282
坡下	0-20	6.89	0.36	16.45	3.55	46.67	0.031	0.031	0.331
	21-40	6.94	0.34	24.85	5.41	50.00	0.026	0.029	0.354
	41-60	6.96	0.40	20.42	4.23	53.33	0.021	0.037	0.316
自然沙地	0-20	7.02	0.15	13.42	3.91	40.00	0.022	0.018	0.231
	21-40	6.97	0.19	15.05	3.71	43.33	0.021	0.016	0.203
	41-60	6.67	0.23	18.55	3.89	45.25	0.027	0.015	0.221

4.4.4 三种防风固沙林立地质量的对比

4.4.4.1 土壤含水量比较

图 4-10 是小叶锦鸡儿人工林和文冠果人工林不同发育阶段土壤的平均含水量 (其中 0 年代表自然沙地)。从中可以看出: 小叶锦鸡儿人工林的土壤平均含水量高于自然沙地, 20a 的小叶锦鸡儿人工林含水量达到最大, 27a 的小叶锦鸡儿人工林含水量最低, 主要因为地下根系较发达, 且分布较深, 地上部分种群生长需要水分较多, 在一定程度上使得地下水位降低, 含水量明细不足, 而 20a 小叶锦鸡儿人工林在群落组成及生长条件上明显好于 27a 生小叶锦鸡儿人工林, 这也在一定程度上反映出 20a 小叶锦鸡儿群落更有利于恢复生态环境及土壤立地质量等, 小叶锦鸡儿人工林在此龄级的稳定性更好一些。文冠果人工林的土壤平均含水量高于自然沙地, 44a 的文冠果人工林含水量达到最大, 自然沙地土壤含水量最低, 是由于植被较少, 地表温度较高, 地下植被根系也

很少，不能保持住土壤中的大部分水，而 31a 文冠果出现土壤含水量明显下降，在一定程度上是由于选择样地具有一定坡度，同时坡面与当地在主风向垂直，导致该种群地面风速平均较大，使得地表及地下土壤平均含水量下降。小叶锦鸡儿人工林和文冠果人工林的土壤平均含水量变化趋势明显不同，相比较而言，小叶锦鸡儿人工林的土壤含水量要高于文冠果人工林土壤含水量，同时也可以得出小叶锦鸡儿人工林在 20a 之后土壤立地条件明显是衰退环境，不利于小叶锦鸡儿人工林的生长，文冠果由于植株生长较大，吸收土壤水分要求较多，使得土壤含水量明细下降。三种不同物种由于所处的沙地条件不同，踏郎人工林土壤平均含水量明显低于小叶锦鸡儿和文冠果人工林。

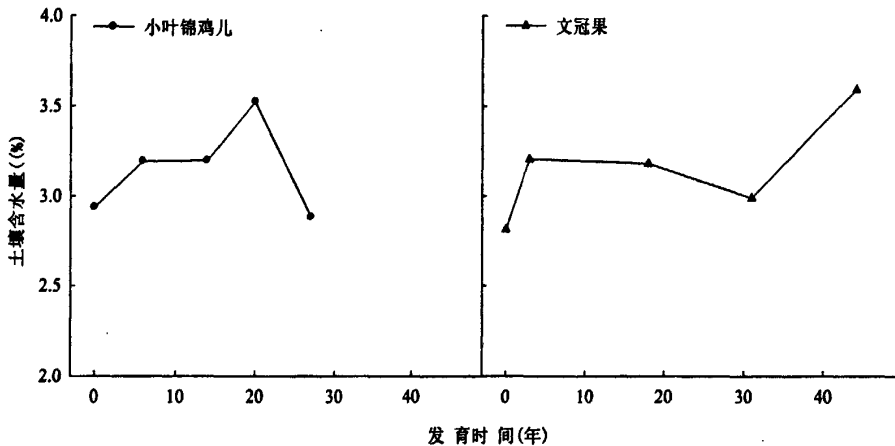


图 4-10 小叶锦鸡儿和文冠果人工林不同发育阶段土壤平均含水量

4.4.4.2 土壤物理性质比较

图 4-11 是小叶锦鸡儿和文冠果人工林不同发育阶段土壤平均物理性质指标（其中 0 年代表自然沙地）。从中可以得出：小叶锦鸡儿的物理性质要明细好于自然沙地，20a 的小叶锦鸡儿人工林物理性质最好。文冠果的大部分物理性质指标好于自然沙地，44a 的文冠果人工林物理性质最好。这说明在科尔沙地上种植小叶锦鸡儿和文冠果人工林对土壤的物理性质起到了改善的作用，相比较而言，小叶锦鸡儿人工林对土壤物理性质的改善作用要好于文冠果人工林，这主要是由于小叶锦鸡儿人工林的枯枝落叶比较多而且易分解，使土壤的有机质增多，使土壤表层变得疏松，容重降低，孔隙度增大，同时也由于小叶锦鸡儿物种本身更新繁殖能力较强，适应干旱能力等都较强，能更好地恢复当地的土壤立地质量。踏郎土壤物理性质在一定程度上不如小叶锦鸡儿和文冠果，很大原因是所处立地条件不同，但总体上可知，踏郎恢复土壤立地质量效果很好，能体现出踏郎物种本身有很好的更新和适应品质，是半流动沙地的栽植极佳物种。

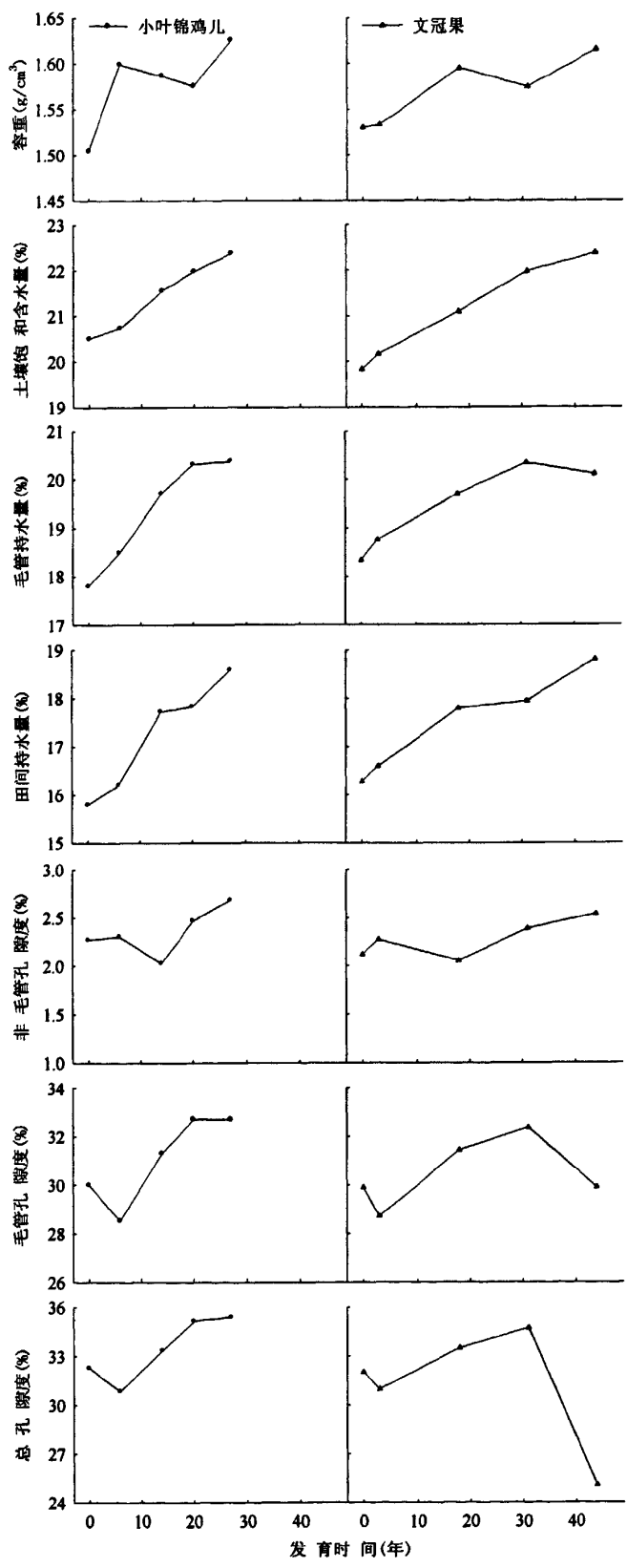


图 4-11 小叶锦鸡儿和文冠果人工林不同发育阶段土壤物理性质

4.4.4.3 土壤化学性质比较

图 4-12 是小叶锦鸡儿和文冠果人工林不同发育阶段土壤肥力指标。图中可知：小叶锦鸡儿和文冠果人工林的土壤平均养分指标总体好于自然沙地，20a 小叶锦鸡儿人工林化学性质相对同种群其他龄级要好些，这在一定程度上更有利于该种群根部吸收矿质元素，同时也说明该龄级在吸收和利用土壤矿质元素含量较大，对植株生长更有利；文冠果总体上 44a 土壤化学性质较其他龄级更佳，对当地土质的改良起到很大作用，同时也为物种的持续稳定生长提供有利前提条件；踏郎物种对土壤化学性质也有了很大的恢复作用。以上化学性质对比可知，通过在科尔沙地上种植人工固沙林，对土壤起到了很大改良效果，相比较而言，小叶锦鸡儿对土壤的改良效果要好于文冠果，这主要是由于小叶锦鸡儿人工林的枯枝落叶比较多而且易分解，而文冠果种群由于每年当地都要进行果实采摘，在一定程度上造成土壤化学元素“流失”，所以小叶锦鸡儿土壤的养分条件比较好。

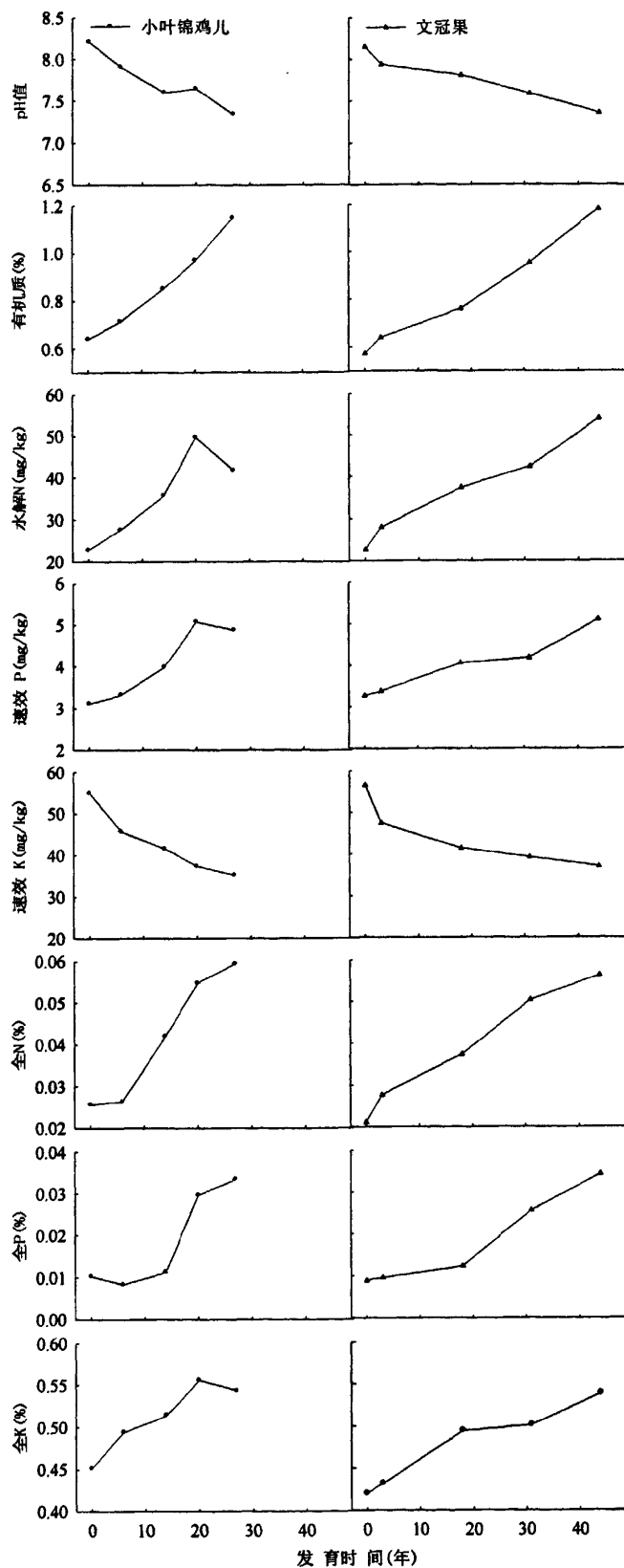


图 4-12 小叶锦鸡儿和文冠果不同发育阶段土壤肥力指标

4.4.4.4 土壤粒径比较

由表 4-19 可知，不同树种沙地 0-60cm 粒径平均机械组成明显不同。三种人工林沙地粒径中粗砂值最高体现在文冠果沙地，其值为 0.15；最小值出现在踏郎半流动沙地，其值为 0.06，而从文冠果和踏郎俩物种来看，极细砂所占比例正好相反，而小叶锦鸡儿的粒径变化范围在以上俩物种之间。三种人工林沙地粒径整体多分布在细砂和中砂粒段，综合分析可知，三种人工林对沙地土壤粒径改良文冠果明显好于小叶锦鸡儿，而踏郎效果相对最差。

表 4-19 不同物种沙地土壤颗粒机械组成测定结果

树种	取样深度 (cm)	粒径组成（风干土重%）				粒径（mm）
		粗砂	中砂	细砂	极细砂	
		1-0.5	0.5-0.25	0.25-0.1	<0.1	
小叶锦鸡儿	0-60	0.12	23.1	63.3	13.48	
文冠果	0-60	0.15	21.8	71.4	6.65	
踏郎	0-60	0.06	35.9	44.8	19.24	

4.5 人工防风固沙林稳定性综合分析

4.5.1 M 稳定性指标

图 4-13 是不同发育阶段小叶锦鸡儿和文冠果与不同生境踏郎人工固沙林 M 稳定性指数。M 稳定性指数是以群落整体特征为依据，全面系统分析群落稳定性的一种方法。种百分数 Z 与累积相对频度 P 的比值越接近于 20/80，群落越稳定。从中可以看出：20a 小叶锦鸡儿人工林 M 稳定性高于同种其他龄级人工林，其 M 稳定性指数为 76.8，27a 值为 73.3 仅次于 20a 小叶锦鸡儿 M 稳定性指数，而 6a 生小叶锦鸡儿值 M 稳定性值最小为 62.4；文冠果 44a 群落 M 稳定性指数最大，为 70.9，3a 生文冠果 M 稳定性值最小为 59.2；踏郎不同生境条件下可以看出坡下 M 稳定性指数最高为 70.8，破中最小为 57.3，坡上居中为 61.7。小叶锦鸡儿人工林稳定性总体高于文冠果人工林稳定性；而坡下的踏郎人工林稳定性高于其他坡位的踏郎人工林。相比较而言，发育 20a 的小叶锦鸡儿人工林稳定性最高，种群结构复杂且合理。

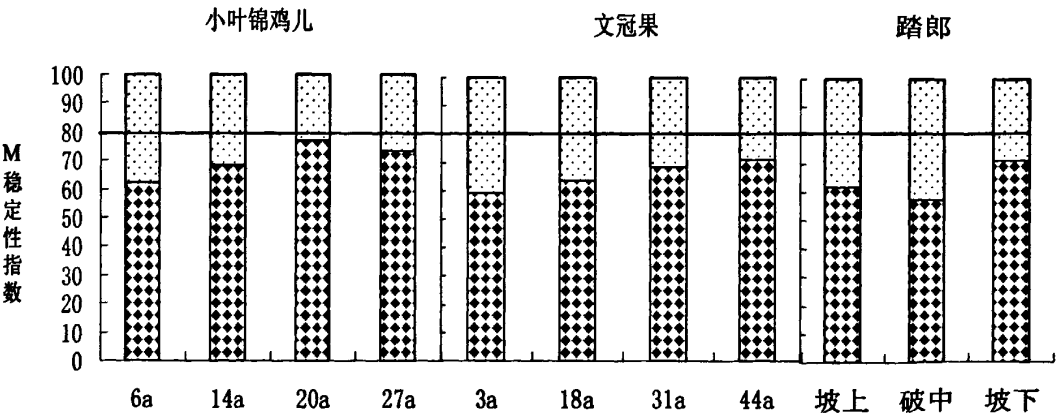


图 4-13 不同发育阶段小叶锦鸡儿和文冠果与不同生境踏郎 M 稳定性指数

注：  种百分数；  累积相对频度

4.5.2 人工防风固沙林稳定性综合评价

灰色关联度分析是灰色系统理论中因子分析及关系分析的主要方法。是把因子视为一种灰关系，通过灰关系的关联分析从而确定灰色系统的主要结构。具体方法为先对原始数据进行标准化处理，选择各因子达理想状态时的数值为参考点，组成参考数列，即 $x_0 = [1, 1, \dots, 1]$ ，运用公式 $\Delta_{ij}(p) = |x_{ij} - x_0|$ ， $i = 1, 2, \dots, n$ ； n 为各因子观察值个数； $p = 1, 2, \dots, m$ ； m 为因子数，计算差值序列。然后求算 Δ_{ij} 的最小值 $\Delta_{\min}$ 和最大值 $\Delta_{\max}$ ；根据公式 $L_{ij}(p) = (\Delta_{\min} + 0.5\Delta_{\max}) / (\Delta_{ij} + 0.5\Delta_{\max})$ 计算关联系数序列，根据 $R_{ij} = \sum L_{ij}(p) / m$ 计算关联度^[40-43]。人工防风固沙林的稳定性由很多方面决定，本研究选取土壤肥力、物种多样性、M 指数三个指标用灰色度关联方法对人工防风固沙林的稳定性进行综合判断。

4.5.2.1 同种人工防风固沙林稳定性综合评价

表 4-20 是不同发育阶段小叶锦鸡儿人工林稳定性的综合判定结果，不同发育阶段的小叶锦鸡儿人工林群落稳定性存在差异，从土壤肥力、物种多样性、M 稳定性指数及关联度可知，20a 小叶锦鸡儿种群明显好于 27a 小叶锦鸡儿种群，由评定的排名可知：20a>27a>14a>6a。表 4-21 是不同发育阶段文冠果人工林稳定性的综合判定结果，不同发育阶段的文冠果人工林群落稳定性存在差异，文冠果随着龄级的增加而群落结构更加复杂且合理，恢复生态效果也随之增强，由评定的排名可知：44a>31a>18a> 3a。表 4-22 是不同生境踏郎人工林稳定性综合判定结果，不同生境条件下的小叶锦鸡儿人工林群落稳定性存在差异，这主要是由于生境不同导致人工林生物量、枯落物的多少以及分解程度不同，同时坡上、坡中的土壤表层有机质等营养物质冲刷到坡下，使得坡下的踏郎人工林土壤疏松，孔隙度增大等，坡下的踏郎人工林土壤平均含水量最高,水分条件比较好，对踏郎的生长更有利。半流动沙丘在主风力作用下，坡下坡度较缓且植株密集受表面风力影响较弱，而坡中由于空气动力学及风沙物理学原理，使得破中风速反而较大，对土壤含水量及植被生长不利，由评定的排名可知：坡下>坡上>坡中。

表 4-20 不同发育阶段小叶锦鸡儿人工林稳定性综合评判结果

人工林	土壤肥力	物种多样性	M 稳定性指数	关联度	排名
6a	0.1667	0.4667	0.6241	0.2987	4
14a	0.2435	0.5824	0.6853	0.3788	3
20a	0.3667	0.8217	0.7682	0.6144	1
27a	0.3333	0.7048	0.7334	0.4531	2

表 4-21 不同发育阶段文冠果人工林稳定性综合评判结果

人工林	土壤肥力	物种多样性	M 稳定性指数	关联度	排名
3a	0.1538	0.4513	0.5924	0.2854	4

18a	0.2264	0.5222	0.6373	0.3635	3
31a	0.3412	0.7147	0.6855	0.4798	2
44a	0.3751	0.7302	0.7092	0.6001	1

表 4-22 不同生境踏郎人工林稳定性综合评判结果

人工林	土壤肥力	物种多样性	M 稳定性指数	关联度	排名
坡上	0.3667	0.4567	0.6173	0.4967	2
破中	0.3333	0.4333	0.5736	0.4833	3
坡下	0.4333	0.7799	0.7086	0.6333	1

4.5.2.2 三种人工防风固沙林稳定性综合评价

表 4-23 是科尔沁地区不同树种人工防风固沙林稳定性综合评判结果。选取三种人工防风固沙林中最稳定的林分，按照同种物种方法进行不同树种间稳定性计数，综合比较由评定的排名可知：20 年的小叶锦鸡儿防风固沙林最稳定，44 年的文冠果人工防风固沙林次之，坡下的踏郎人工防风固沙林稳定性相对较差。这说明在科尔沁沙地种植的这三种主要的人工固沙林中，小叶锦鸡儿固沙林的自身稳定性最好，这与树种本身的特性有关，说明小叶锦鸡儿人工林还是比较能适应科尔沁沙地的自然条件，在起到防风固沙作用的同时自身群落的结构和功能达到一个相对比较稳定的状态。文冠果人工固沙林在物种多样性方面比小叶锦鸡儿人工林要差一些，但从生态效益和经济效益综合方面说明科尔沁沙地地区的文冠果人工固沙林也有其特定的作用，在防风固沙林建设中是必不可少的。踏郎人工林作为固定半流动沙地物种有着特殊的意义，踏郎人工林在稳定性方面要比小叶锦鸡儿和文冠果差一些，但在半固定沙地和固定沙地的固沙过程中的先锋作用同样是不可忽视的。

表 4-23 不同树种人工防风固沙林稳定性综合评判结果

人工林	土壤肥力	物种多样性	M 稳定性指数	关联度	排名
小叶锦鸡儿 20a	0.7462	0.8231	1.0000	0.6144	1
文冠果 44a	0.6895	0.7447	0.9152	0.6001	2
踏郎坡下	0.4673	0.6603	0.7011	0.5333	3

结论与讨论

1 结论

(1) 本文通过对科尔沁沙地防风固沙林种群结构变化研究, 表明该地区小叶锦鸡儿属于稳定种群, 补充率大致等于死亡率, 小叶锦鸡儿种群随着年龄的增长, 幼苗增长数量大致等于成年死亡数量, 在一定程度上体现种群的趋于稳定。文冠果随着龄级的增长, 幼苗的数量减少, 大径级的个体数增多, 而种群幼苗非常少, 这说明文冠果物种本身萌蘖能力较差, 如果没有人为进行繁殖, 由于温度、水分立地质量等条件的限制, 文冠果自身的延续是比较难, 总体上文冠果种群体现出衰退种群, 大多数个体已经过了生殖年龄, 种群的大小趋向减少, 这就需要人为的抚育措施。踏郎灌木是科尔沁半流动沙地防风固沙林的主要物种, 在林分的质量和生产力方面有很强的优势, 是一种很好的耐干旱树种, 作为一种重要的固沙物种, 它发挥着很大的作用。通过对不同生境条件下的踏郎地径和高度的研究, 表明踏郎的稳定性受不同生境土壤水分、养分等的影响, 在坡下的踏郎种群由于有较好的土壤水分、养分条件, 长势较好, 稳定性比较好, 总体上踏郎种群体现为增长种群, 有许多幼年个体, 物种本身萌蘖能力很强, 补充率大于死亡率, 种群继续扩大, 稳定性也逐渐增强。

(2) 土壤地表土粒度特征对土壤风蚀具有直接的影响作用, 研究不同种群地表土粒度特征对了解不同尺度上土壤特性的空间异质性和土壤侵蚀、土壤利用变化及种群对土壤的影响程度和尺度具有重要的参考价值, 同时也反映出在其土壤中生长的物种稳定性程度。因此本文通过对科尔沁地区三种不同种群人工固沙林进行土壤地表土粒度特征综合分析, 可以较为清晰地得出, 三种不同种群地表土粒度分化较明显, 表现出一定的规律, 即小叶锦鸡儿和文冠果随着龄级的增加表现出沙粒段即(1-0.05mm)粒径段所占比例逐渐下降, 而粗砂粒(1-0.25mm)所占比例逐渐上升, 同时细砂粒(0.25-0.05mm)出现下降趋势, 而踏郎种群按照破中、坡上和坡下则同样也表现出这规律。即半固定沙地(小叶锦鸡儿、文冠果样地)最为粗化且分选较好, 峰值较大, 其次为半流动沙地(踏郎样地), 表现出风蚀沙化的阶段性。根据土壤粒度分布特征对土壤风蚀的影响, 研究得出不同龄级小叶锦鸡儿和文冠果地表土敏感颗粒敏感粒径段占易蚀粒径段的相对值大小表现为, 小叶锦鸡儿: 自然沙地地>6a>14a>20a>27a; 文冠果: 自然沙地>5a>18a>33a>44a; 踏郎: 自然沙地>破中>坡上>坡下, 在一定程度上认为, 该地区大范围的沙尘暴天气的尘源物主要来源于自然沙地及栽植人工林生长植被较少的低龄级林地表土颗粒。

(3) 本人在对人工固沙林群落物种多样性研究得知, 科尔沁沙地小叶锦鸡儿和文冠果人工固沙林随着发育时间的增长, 群落的物种丰富度和多样性指数整体呈上升趋势, 并且都远远高于自然沙地。这说明在科尔沁沙地栽植小叶锦鸡儿和文冠果人工固沙

林取得了很大的效果,新的物种入侵,使人工固沙林群落内的林下植物物种趋于复杂,分布趋于均匀,物种多样性提高。相比较而言,小叶锦鸡儿人工固沙林群落的丰富度和多样性要高于文冠果人工固沙林,对植被的恢复情况较好,对生态环境的恢复也是效果明细。踏郎人工固沙林在半流动沙地上的固沙效果是比较好的,有很强的萌蘖能力,与小叶锦鸡儿和文冠果固沙林相比,在物种的丰富度和多样性上要差一些,但在生境条件比较好的坡下等位置的小叶锦鸡儿对植被的恢复情况还是比较好的,能够很好地控制地表细沙不被大量吹走,使半流动沙地逐渐得到恢复,对生态环境的改善有很重要的意思,是半流动沙地栽植的优良物种之一。

(4) 通过对人工防风固沙林的土壤水分和理化性质的研究,表明由于科尔沁沙地上小叶锦鸡儿和文冠果人工林的土壤平均含水量高于自然沙地,并且俩物种林地的土壤平均含水量变化趋势基本上是一致的,相比较而言,小叶锦鸡儿人工林的土壤含水量要高于文冠果土壤含水量;小叶锦鸡儿和文冠果人工林的大部分物理性质指标和化学性质指标好于自然沙地,这说明在科尔沁沙地上种植小叶锦鸡儿和文冠果人工林对土壤立地质量起到了改良的作用。对比小叶锦鸡儿人工林对土壤物理性质和化学性质的改善作用要好于文冠果人工林,这主要是由于小叶锦鸡儿人工林的枯枝落叶比较多而且易分解,使土壤的有机质增多,使土壤表层变得疏松,同时小叶锦鸡儿人工林自身在生长消耗方面就少于文冠果人工林。综合土壤各项指标,20a 的小黑杨人工林和 44a 的樟子松人工林土壤水分和理化性质达到最好。不同坡位踏郎人工林由于雨水的冲刷及重力作用,坡上的土壤表层有机质等营养物质冲刷到坡下,导致坡下的踏郎人工固沙林土壤疏松,孔隙度增大,水分、养分条件相对最好。

(5) 在对科尔沁沙地防风固沙林 M. Godron 指数的研究中得出:20 a 小叶锦鸡儿人工林稳定性高于同种其他龄级小叶锦鸡儿人工林;44a 的文冠果人工林稳定性高于同种其他龄级文冠果人工林;坡下踏郎人工林稳定性高于其他坡位踏郎人工林,相比较而言,发育 20a 的小叶锦鸡儿人工林稳定性最高,群落结构复杂且合理。小叶锦鸡儿和文冠果人工固沙林的稳定性高于踏郎人工固沙林。

(6) 本文运用灰色关联度分析法,对不同发育阶段小叶锦鸡儿和文冠果人工林以及不同生境条件踏郎人工林稳定性进行综合判定,由评定的排名可知,不同发育阶段的小叶锦鸡儿和文冠果人工林群落稳定性存在差异,小叶锦鸡儿:20a>27a>14a>6a;文冠果:44a>31a>18a>3a;不同生境踏郎人工林稳定性存在差异:坡下>坡上>坡中。最后选择三种不同树种固沙林中最稳定的种群重新按照同物种方法进行稳定性比较,得出结论:20a 的小叶锦鸡儿人工固沙林稳定性最好,44a 文冠果次之,踏郎坡下相对最差。这说明在科尔沁沙地栽种的这三种主要的人工固沙林中,小叶锦鸡儿固沙林的自身稳定性最好,这与树种本身的特性有关,小叶锦鸡儿人工林还是比较能适应该地区自然条件,在起到防风固沙作用的同时自身群落的结构和功能达到一个相对比较稳定的状态,同时也能得出踏郎人工林在半流动沙地上适应性极好,有很强的耐旱性和自身的萌蘖能力,对生态环境前期恢复有很强的发挥作用,是该地区人工进行治理半流动沙

地不可缺少的优良物种。

2 讨论

(1) 科尔沁沙地的人工固沙林树种单一, 杨树和小叶锦鸡儿, 山杏的栽植面积最大。在一定程度上结构不合理, 大部分都是乔木或灌木纯林, 缺少混交林, 容易遭受病虫害攻击, 大面积的人工纯林容易造成地力退化, 连作生产力下降, 林分密度过大也是影响科尔沁沙地人工固沙林稳定性的主要因素。稳定的森林生态系统应该是乔、灌、草相结合的立体结构, 而该地区沙地大部分是第一树种的灌木固沙林, 在垂直结构上比较单一。

(2) 本文对人工固沙林这一特定群落来说, 稳定的群落在持续发挥着防风固沙作用的前提下, 应具备以下条件: 适于当地环境条件、对外界干扰具有抵抗性和恢复性、正常生长发育和自我更新能力以及有较为完善的种群结构。通过采用空间代替时间的方法对不同发育阶段的小叶锦鸡儿和文冠果人工林的稳定性进行了分析, 对不同指标的测定和比较, 较好的反映出了防风固沙林稳定性的变化趋势。但是由于实验条件所限, 所选的样地年龄梯度可能不是最理想的, 如果样地的林龄的梯度再大些, 效果会更好。踏郎人工固沙林样地的选择也有着局限性, 如果再多些生境条件类型的对比会更全面, 同时踏郎引入当地进行治沙林龄较小, 如果经过更长时间后, 踏郎灌木人工林会更加稳定, 对生态环境的改良效果会更佳。同时本次研究也发现气候因子和地下水位的问题是影响防风固沙林稳定性的一个重要因素, 但由于实验条件所限, 本文没有做这方面的研究, 以及进一步研究人工林也天然林之间更方面差异所在, 详细研究和分析两种生长方式间关联性非常有必要, 在今后的研究中应该进一步深入研究。

(3) 由于科尔沁沙地的人工固沙林大多均为单优群落, 所以稳定性取决于优势种群的抗逆性和恢复能力, 这涉及到优势种群的抗火烧能力、抗干旱耐贫养能力及抗寒害、病虫害和更新能力等。更新能力在本文中已作了研究, 其它优势种群的抗性和恢复能力还有待进一步研究。科尔沁沙地栽植的人工固沙林是以一种嵌块体形式存在的, 虽然生长的好, 但多数天然更新不好, 不是顶极群落。然而, 干扰作为一个重要的演替机制, 有逆向干扰, 如冻、旱害、病虫害等, 也有正向干扰, 如引种、抚育等。沙地人工林就是由于小面积的正向干扰而形成的引种嵌块体, 嵌块体的周期和稳定性取决于人类的经营管理活动, 如果不进行管理, 基质的物种就会入侵嵌块体, 并发生演替, 最终嵌块体消失, 只有通过人为的抚育措施才能使种群得以延续, 形成一个稳定的引种嵌块体。

(4) 综上所述, 科尔沁沙地人工防风固沙林稳定性是植物群落的一个综合性特征。沙地人工固沙林群落目前处于相对稳定和缓慢发展的状态, 但与天然群落相比其稳定性还有相当大的差距, 在物种多样性、以及对外界极端环境条件的抵抗和补偿能力、自我修复和更新能力等方面上都比天然群落差。稳定性受群落内的优势种群的更新情况、生物多样性、林分的土壤条件、气象因子的扰动等一系列生物生态学过程的影响。

响，在不同的情况下，不同的因子成为影响植被稳定性的主导因素。在今后的研究中要对植被的结构与功能进行深入研究，全面认识群落稳定性的机制和内涵以及影响群落稳定性的因素。通过对科尔沁沙地人工防风固沙林稳定性的理论研究来指导该地区人工植被建设，为树种的选择、林分结构的合理配置、改善沙地生态环境提供依据。

参考文献

- [1] 王礼先, 王斌瑞, 朱金兆等. 林业生态工程学: 中国林业出版社, 2000:21~62
- [2] 杨有林, 卢琦. 以色列的荒漠化整治与林业建设. 世界林业研究, 1996, 4:41~46
- [3] 慈龙骏, 吴波. 中国荒漠化气候类型划分与中国荒漠化潜在发生范围的确定. 中国沙漠, 1997, 17(2):107~112
- [4] 周欢水, 向众, 申建军等. 我国荒漠化灾害综述. 灾害学, 1998, 3:67~71
- [5] 高新才, 高育红. 西部荒漠治理敢问路在何方. 绿色中国, 2005, 7:51~53
- [6] 朱俊凤, 朱震达. 中国沙漠化防治. 北京: 中国林业出版社, 1999:15~37
- [7] CCICCD. China country paper to combating desertification Beijing. China Forestry Publishing House, 1996, 12(3):25-56
- [8] 孙保平. 荒漠化防治工程学. 北京: 中国林业出版社, 2000:11~45
- [9] 孟祥楠, 赵雨森. 嫩江沙地防风固沙林稳定性研究. 东北林业大学硕士论文. 2007:14~42
- [10] 陈祝春. 科尔沁沙地沙丘土壤微生物学活性. 中国沙漠, 1995, 15(3):283~287
- [11] 陈隆亨, 李福兴, 邸醒民等. 中国风砂土. 北京: 科学出版社, 1998:24~39
- [12] 朱彪, 陈安平, 刘增力等. 南岭东西段植物群落物种组成及其树种多样性垂直格局的比较生物多样性, 2004, 12(1):53~62
- [13] 薛勇. 毒签熏蒸法防治蛀干害虫. 河北农业科技 2001, (7):45~46
- [14] 蒋德明, 刘志明, 曹成有等. 科尔沁沙地荒漠化过程与生态恢复. 北京: 中国环境科学出版社, 2003:40~88
- [15] 川锅佑夫, 南寅镐, 张素君等. 沙化草地恢复过程中植被及土壤的变化. 水土保持科技情报, 2000, (4):16~21
- [16] 侯兆伦, 杨国庆, 朱宇旌等. 科尔沁沙区草地的成因及治理. 中国草地, 1997, (3):24~27
- [17] 林开敏, 黄宝龙. 杉木人工林林下植物物种 α 多样性的研究. 生物多样性, 2001, 9(2):152~161
- [18] Swinded B F. Methodology for predicting species diversity in managed communitys. Community Ecology and Management, 1991, 40:70-85
- [19] 阎海平, 谭笑, 孙向阳. 北京西山人工林群落物种多样性的研究. 北京林业大学学报, 2001, 23(1):16~19
- [20] 杜书坤. 沙地造林整地对土壤物理性质和幼林生长的影响. 防护林科技, 1996, (2):16~18
- [21] 安树青, 张久海, 谈健康等. 森林植被动态研究评述. 生态学杂志, 1998, 17(5):50~58
- [22] 叶万辉. 物种多样性与植物群落的维持机制. 生物多样性. 2000. 8(1):17~24
- [23] 王义凤. 黄土高原地区植被资源及其合理利用. 北京: 中国科学技术出版社, 1991:23~24
- [24] 林开敏, 黄宝龙. 杉木人工林林下植物物种 β 多样性的研究. 生物多样性, 2001, 9(2):152~161
- [25] Fisher R A, *et al.* The relation between the number of species and the number of individuals in random samples of an animal population. J Anim Ecol, 1943, 12:43-58
- [26] Magurran. Ecological diversity and its measurement. New Jersey: New Jersey Princeto University Press. 1988
- [27] Rosoman G. The plantation effects GreenpEace New Zealand. 1994, 48-56
- [28] 肖荣寰. 松嫩沙地的土地沙漠化研究. 东北师范大学出版社, 1995:25~62

- [29]Magurran, A. E. Ecological diversity and its measurement. New Jersey: Princeton University Press, 1998
- [30]Tilman, D. *et al.* Productivity and sustainability influenced by biodiversity in grassland ecosystem. *Nature*, 1996, 379(22):718-720
- [31]张继义, 赵哈林, 张铜会等. 科尔沁沙地植物群落恢复演替系列种群生态位动态特征. *生态学报*. 2003, 22(4):42~48
- [32]阎海平, 谭笑, 孙向阳. 北京西山人工林群落物种多样性的研究. *北京林业大学学报*, 2001, 23(1):16~19
- [33]周择福, 王延平, 张光灿. 五台山地区典型人工林群落物种多样性研究. *西北植物学报*, 2005, 25(2):321~327
- [34]秦新生, 刘苑秋, 邢福武. 低丘人工林林下植被物种多样性初步研究. *热带亚热带植物学报*, 2003, 11(3):223~228
- [35]朱彪, 陈安平, 刘增力等. 南岭东西段植物群落物种组成及其树种多样性垂直格局的比较生物多样性, 2004, 12(1):53~62
- [36]曾德慧, 姜凤歧. 樟了松人工固沙林稳定性研究. *应用生态学报*, 1996, 7(4):337~343
- [37]工世绩. 杨树研究进展. 北京: 中国林业出版社. 1995:23~28
- [38]刘世荣. 沙棘对中国亚湿润干旱区杨树人工林生长与生产力的影响. *植物生态学报*, 2005, 24(2):169~174
- [39]杨文治, 邵明安, 彭新德等. 黄土高原环境旱化与黄土中水分关系. *中国科学*. 1998, 28(4):357~365
- [40]中国林学会森林生态分会. 人工林地力衰退研究. 北京: 利学技术出版社, 2005:49~71
- [41]陈楚莹. 改善杉木人工林的林地质量和提高生产力的研究. *应用生态学报*, 1999, 1(2):97~106
- [42]杨维西. 试论我国北方地区人工植被的土壤干化问题. *林业科学*, 1996, 32(1):78~84
- [43]冯今朝, 陈荷生, 康跃虎等. 腾格里沙漠沙坡头地区人工植被蒸散耗水与水量平衡研究. *植物学报*, 1995, 37(10):815~821
- [44]张继义, 赵哈林. 植被(植物群落)稳定性研究评述. *生态学杂志*, 2003, 22(4):42~48
- [45]黄建辉, 韩兴国. 生物多样性和生态系统稳定性. *生物多样性*, 1995, 3(1):31~37
- [46]刘增文, 李雅素. 生态系统稳定性研究的历史与现状. *生态学杂志*, 1997, 16(2):58~61
- [47]党承林, 王崇云, 王宝荣. 等植物群落的演替与稳定性. *生态学杂志*, 2002, 21(2):30~35
- [48]李振基, 刘初钿, 杨志伟等. 武夷山自然保护区郁闭稳定甜槠林与人为干扰甜槠林物种多样性比较. *植物生态学报*, 2000, 24(1):64~68
- [49]彭少麟, 方炜, 任海等. 鼎湖山厚壳桂群落演替过程的组成和结构动态. *植物生态学报*, 1998, 22(3):245~249
- [50]黄富祥, 刘旭阳. 生态平衡概念刍议. *生态学杂志*, 1997, 16(5):67~71
- [51]韩博平. 生态系统稳定性: 概念及其表现. *华年师范大学学报(自然科学报)*, 1994, 2:37~44
- [52]PimmSL. The complexity and stability of ecosystems. *Nature*, 1984, 307:3221-3226
- [53]孙儒泳. 动物生态学原理(第三版). 北京: 北京师范大学出版社, 2001, 360~378
- [54]郑元润. 森林群落稳定性研究方法初探. *林业科学*, 2000, 36(5):28~32
- [55]周集中, 马世骏. 生态系统稳定性. 北京: 利学出版社, 1990, 20~25
- [56]王国宏. 再论生物多样性与生态系统的稳定性. *生物多样性*, 2002, 10(1):126~134
- [57]赵书田. 森林资源动态系统稳定性规律的研究. *林业调查规划*. 2001, 26(4):5~8
- [58]HollingCS. Resilienee and stability of eeological systems. *Ann, Rcv. Ecol. Syst.* 1973. 4:1-23

- [59]Sennhauser EB. The concept of stability in connection with the gallery forests of the Chaco region. *Vegetation*. 1991, 94:1-13
- [60]蔡晓明. 生态系统生态学. 北京: 科学出版社, 2000, 106~110
- [61]MacArthur RH. Fluctuations of animal populations and a measure of community stability. *Ecology*, 1975, 36: 533-536
- [62]Grimm V, Schmidt E, Wissel C. On the application of stability concepts in ecology. *Ecol. Modelling*, 1992, 63:143-161
- [63]庄雪影. 香港 3 种人工林下植物多样性的调查. *热带亚热带植物学报*, 1998, 6(3): 196~202
- [64]郑元润. 森林群落稳定性研究方法初探. *林业科学*, 2000, 36(5):28~32
- [65]Pimm S L. The complexity and stability of ecosystem. *Nature*. 2000, (403):843-845
- [66]孙儒泳. 动物生态学原理 (第 2 版). 北京: 北京师范大学出版社, 1992:45~65
- [67]周集中, 马世骏. 生态系统稳定性. 现代生态学透视, 北京: 科学出版社, 1990:33~76
- [68]黄建辉. 生物多样性研究的原理与方法. 北京: 中国科学技术出版社, 1994:32~45
- [69]J. P 金明仕. 森林生态学 (文剑平译). 北京: 中国林业出版社, 1991:26~35
- [70]Mrgalef, R. Diversity, stability and maturity in natural ecosystems. In Dobben W. H, Loue-Mcconnell R. H, (eds.) *Unifying Concepts in Ecology*, Wageningen: Centre for agricultural publishing and documentation. 1975:26-78
- [71]Hill. A. R. Ecosystem stability in relation to stresses caused by human activities, *Canad. Geographer*, 1975, 19(3):206-220
- [72]黄建辉. 生物多样性和生态系统稳定性. *生物多样性*, 1995, 3(1):31-37
- [73]Begon M, *et al.* *Ecology: Individuals, populations and communities*. 2nd ed Boston: Blackwell Scientific Publications, 1990:26-64
- [74]Lewontin, R. C. The meaning of diversity. In Woodwell, GSM. and Smith, H. H. (eds.). *Diversity and Stability in Ecological Systems*. Upton: Brookhaven National Laboratory, 1969:33-45
- [75]Fonseca C R. and Ganade G. Species functional redundancy, random extinctions and the stability of ecosystems, *The Journal of Ecology*, 2001, 89(1):118-125
- [76]张荣, 张大勇. 半干旱区春小麦不同年代品种根系生长冗余的比较实验研究. *植物生态学报*, 2000, 24(3):298~303
- [77]Odum E P. *Basic Ecology*. Philadelphia: Saunders College Publishing, 1983:46-155
- [78]任明迅, 吴振斌. 植物的冗余及其生态学意义 I. 大型水生植物生长冗余的比较实验研究. *植物生态学报*, 2001, 21(7):1072~1078
- [79]MacArthur, R. Fluctuations of animal populations and a measure of community Stability. *Ecology*, 1955, (35):533-536
- [80]Elton C S. *The Ecology of Invasions by Animals and Plants*. London: Chapman and Hall, 1958:143-153
- [81]McNaughton S J. Diversity and stability. *Nature*, 1988, 204-333
- [82]Gardner MR, Ashby WR. Connectance of large dynamic (cybernetic) system: Critical values for stability. *Nature*, 1970, 228-784
- [83]May RM. *Stability and Complexity in Model Ecosystems* (2nd ed). Princeton: University Press, 1974:123-159
- [84]宋新章, 毕学云, 张智婷等. 生物多样性与生态系统稳定性关系小议. *河北林业科技*, 2003, (6):27~28
- [85]Goodman D. The theory of diversity-stability relationships in ecology. *The Quarterly Review of Biology*, 1975, 50(3):237-240
- [86]McCann K, Hastings A, Huxel GR. Weak trophic interactions and the Balance of Nature. *Nature*, 1998, 393-798
- [87]Hariston N G, Allan J D, Colwell R K, *et al.* The relationship between species diversity and

- stability: an experimental approach with protoza and bacteria. Ecology, 1968, 49:1091-1112
- [88]King A N, Pimm S I. Complexity, diversity and stability are Conciliation of the oretical and empirical results. The American Nature, 1983:122-229
- [89]Grime J P. Benefits of plant diversity to ecosystems: immediate, filter and founder effects. Journal of Ecology, 1998, (86): 901-1021
- [90]党承林. 植物群落的冗余结构. 生态学报, 1998, 18(6):665~672
- [91]李跃强, 盛承发. 植物的超越补偿反应. 植物生理学通讯, 1996, 32(6):457~464
- [92]曹成有等. 固沙植物群落稳定性机制的探讨. 中国沙漠, 2004, 24(4):461~465
- [93]党承林. 植物群落的冗余结构-对生态系统稳定性的一种解释. 生态学报, 18(6):578~583
- [94]FrankDA, *et al.* Stability increases with diversity in plant communities: empiricalevidence from the Yellow stone drought. Oikos, 1991, 62:360-362
- [95]Tilman D, DowningJA. Biodiversity and stability in grasslands. Nature, 1994, 367:350-362
- [96]BegonM. *et al.* Ecology: Individuals, Populations and Communities(2nded). Boston: Blackwell Scientific Publications, 1990:816-844
- [97]GrimmV, SchmidtE, WisselC. Ontheapplication of Stability concepts in ecology. Ecol. Modelling, 1992, 63:143-161
- [98]McNaughtonSJ. Diversity and stability of ecological community: a comment on the role of empiricism in ecology. The Amer. Natur, 1997, 111:515-525
- [99]彭少麟. 森林群落稳定性与动态测度. 广西植物, 1987, 7(1):67~72
- [100]阳含熙, 潘渝的, 伍业钢等. 长白山阔叶红松林马氏链模型. 生态学报, 1988, 8(3):211~219
- [101]GodronM. Some aspects of heterogeneity in grasslands of cantal. Statist. Ecol. 1972, 3:397-415
- [102]GardnerMR, AshbyWR. Connectance of large dynamic (cybernetic) system: Critical for stability. Nature, 1970, 228:784-788
- [103]MayRM. Will a large complex system be stable. Nature, 1972, (238):413-414
- [104]刘德广. 荔枝-牧草复合系统节肢动物群落多样性与稳定性分析. 生态学报, 2001, 21(10):1596-1601
- [105]Swinded B F. Species diversity in youny Douglas-fir plantation compared to oldgrowth. Community Ecology and Management, 1988, 23:227-231
- [106]邵青还. 第二次林业革命-“接近自然的林业”在中欧兴起. 世界林业研究, 1991, (4):8-15
- [107]张鼎华. 人工林地力的衰退与维护. 北京: 中国林业出版社, 2001:18~35
- [108]王豁然. 论外来树种人工林的可持续经营. 北京: 中国农业出版社, 1998:33~48
- [109]盛炜彤. 人工林的生物学稳定性与可持续经营. 世界林业研究, 2001, 14(6):14~21
- [110]马兴洲. 辽西地区刺槐人工林稳定性的研究. 沈阳农业大学学报, 1986, 17(1):27~35
- [111]曾德慧等. 樟子松人工固沙林稳定性的研究. 应用生态学报, 1996, 7(4):337~343
- [112]姜凤岐, 曹成有, 曾德慧等. 科尔沁沙地生态系统退化与恢复. 北京: 中国林业出版社, 2002:30~35
- [113]冯耀宗. 人工生态系统稳定性概念及其指标. 生态学杂志, 2002, 21(5):58~60
- [114]刘增文, 李雅素. 生态系统稳定性研究的历史与现状. 生态学杂志, 1997, 16(2):58~61
- [115]左小安, 赵学勇, 赵哈林等. 科尔沁沙地草地退化过程中的物种组成及功能多样变化特征. 生物多样性, 2006(1):5~10
- [116]黄思静. 用 EXCEL 计算沉积物粒度分布参数. 成都理工学院学报, 1999, 4(2):196~198

- [117] 孟宪宇. 测树学. 北京: 中国林业出版社, 1995:23~49
- [118] 张文辉, 赵则海, 孙海芹等. 东灵山辽东栎林优势林木种群直径结构的研究. 植物研究, 2002, 22(1):84~90
- [119] 马克平. 生物群落多样性的测度方法 I-a 多样性的测度方法(上). 生物多样性, 1994, 2(3):162~168
- [120] 马克平. 生物群落多样性的测度方法 I-a 多样性的测度方法(下). 生物多样性, 1994, 2(4):231~239
- [121] 蒋志刚, 马克平. 保护生物学. 杭州: 浙江科学技术出版社, 1997:40~41
- [122] 史作民, 刘市荣, 程瑞梅. 宝天曼地区栓皮栎林恢复过程中高等植物物种多样性变化. 植物生态学报, 1998, 22(5):415~421
- [123] 郭正刚. 白龙江上游地区森林植物群落物种多样性的研究. 植物生态学报, 2003, 27(3):388~395
- [124] 阎桂琴, 赵桂仿, 胡正海. 秦岭太白红杉群落特征及其物种多样性的研究. 西北植物学报, 2001, 21(3):497~506
- [125] 王国梁, 刘国彬, 侯喜禄. 黄土高原丘陵沟壑区植被恢复重建后的物种多样性研究. 山地学报, 2002, 20(2):182~187
- [126] 谢国文, 颜亨梅, 张文辉等. 生物多样性保护与利用, 长沙: 湖南科学技术出版社, 2001:23~35
- [127] 关继义, 陈立新. 土壤实验实习教程. 哈尔滨: 东北林业大学出版社, 2005:23~48, 56~79, 102~148, 162~189
- [128] Swinded B F. Species diversity in youny Douglas-fir plantation compared to oldgrowth. Community Ecology and Management, 1988, 23: 227-231
- [129] Swinded B F. Methodology for predicting species diversity in managed communitys. Community Ecology and Management, 1991, 40:70-85
- [130] 关继义, 陈喜全, 刘永春. 森林土壤实验教程. 哈尔滨: 东北林业大学出版社, 1992:15~16, 17~20, 38~39, 13, 73~76, 88~117, 8~15
- [131] Godron M. Some aspects of heterogeneity in grasslands of Cantal. Statistical Ecology, 1972, 3:397-415
- [132] 汪季, 周心澄, 周建忠等. 沙尘暴尘源形成及分布. 内蒙古农业大学学报, 2003, 24(4):134~141
- [133] 史培军. 中国土壤风蚀研究的现状与展望. 第十二届国际水土保持大会邀请学术报告, 水土保持研究. 2002(2):1~14
- [134] 董治宝, 李振山. 风成沙粒度特征对其风蚀可蚀性的影响. 内蒙古农业大学学报, 2003, 24(4):134~141
- [135] 张文辉. 裂叶沙参种群生态学研究. 哈尔滨: 东北林业大学出版社, 1998:32~45
- [136] Manuel C. Molles J. Ecology, concept and applications(2nded). New York: McGraw-Hill Companies, 2002:186-254
- [137] 徐文铎, 邹春静. 中国陆地生态系统. 北京: 中国林业出版社, 1998:56~89
- [138] 李根前, 黄宝龙, 唐德瑞等. 毛乌素沙地中国沙棘无性系种群年龄结构动态与遗传后果研究. 应用生态学报, 2001, 12(3):347~350
- [139] 柏玉珍. 优良的水土保持树种-踏郎. 水土保持科技情报, 1989(1):8~2
- [140] 邓聚龙. 灰色系统基本方法. 武汉: 华中理工大学出版社, 1987:33~67
- [141] 彭少麟. 热带亚热带恢复生态学研究与实践. 北京: 科学出版社, 2003:43~113
- [142] 张星耀. 森林病理学研究的生态数学方法. 北京: 中国林业出版社, 1999:24~87
- [143] 李跃林, 李志辉, 李志安等. 按树人工林地土壤肥力灰色关联分析. 土壤与环境, 2001, 10(3):198~200

攻读学位期间发表的学术论文

- [1] 杨东华, 赵雨森. 科尔沁沙地防风固沙林踏郎稳定性研究. 水土保持学报, 2009, 5(23):118~122

致谢

本文是在赵雨森教授的悉心指导下完成的。无论从论文的选题、设计和定稿方面，还是从论文思路、野外考察、资料搜集的实现都给予了具体指导，付出了很大的精力。导师和师母在我日常学习、生活和研究中更是给予了极大的帮助。他们的言传身教将使我终生受益。在本论文完成之际，我衷心地感谢导师给予我的指导、关心和帮助！

本文的顺利完成得到了很多老师和领导在不同方面给予的大力的帮助。尤其是土保持与荒漠化学科陈祥伟教授、辛颖老师、土壤学科陈立新教授等，在论文的外业实验和内业处理过程中我还得到了王恩姮博士、王海波博士、孟琳硕士、崔浩然硕士、孔祥飞硕士、夏志光硕士、李猛硕士、张欣硕士、将小金硕士、太秉洋硕士、史长亭硕士、陈敏硕士、武春彦硕士等等的大力帮助，在此，我要对他们表示衷心的感谢！

最后感谢我的父母一直以来对我的支持，感谢我的女友对我生活和学习上的关心和帮助，他们永远是我学习生活的坚强后盾和积极进取的动力！值此论文完成之际，谨向我的导师和所有关心、支持和帮助过我的人致以最真诚的谢意！