

河北农业大学

硕士学位论文

黄羊滩人工生态系统基本特征及其稳定性研究

姓名：付晓燕

申请学位级别：硕士

专业：森林经理

指导教师：黄选瑞

20080601

摘 要

沙漠化是当今世界所面临的环境问题之一,也是我国北方荒漠化的主要表现形式。近几年频繁发生的沙尘暴,对生态环境造成了严重的危害。位于河北省张家口地区的洋河沙地是京津风沙源沙尘的重要源地之一,为了治理该地区的风沙灾害,近些年进行了大规模的生态建设,取得良好的成效。本文以黄羊滩不同类型的人工林为例,在大量的调查和观测的基础上,运用灰色关联度分析法,从土壤物理性质、土壤化学性质、林分生长状况、林下植物多样性,定量综合评价不同类型人工林稳定程度,并针对该地区人工林的现状提出提高人工林稳定性的对策和育林措施。结果表明:

1. 通过对黄羊滩土壤物理性质的测定及分析,我们可以看出:不同的人工林类型,土壤机械组成差别很大。土壤颗粒组成中,1~0.1mm 的颗粒组成百分含量在34.63~96.01%之间,是土壤机械组成中所占的比例最高。土壤颗粒组成大于0.05mm 的占总的颗粒组成的87.98%,从这一组成可以看出黄羊滩地区的人工林土壤沙化现象还比较严重。在我们选取的测定土壤持水性和保水性指标中,土壤容重在1.43~1.68 g/cm³之间,土壤田间持水量在14.94~24.88%之间,持水和保水性比较弱,而土壤的含水量仅为3.74~6.68%之间,含水量水平比较低,且各层次之间土壤含水量变化也不明显。

2. 黄羊滩地区由于常年风沙比较大,地下枯落物比较少,造成该地区的土壤有机质含量较低,其中有机质含量最高的样地为5号样地的小叶杨、杏树混交林地,为7.812 g/kg,最小的为14号样地的紫穗槐、樟子松的混交灌木林地,有机质含量为1.488 g/kg。通过综合评价5号样地的小叶杨、杏树混交林地的土壤养分关联系数最高,土壤养分状况最好。

3. 通过对黄羊滩不同人工林生长状况的比较,小美旱杨和新疆杨的树高年平均生长量是最大的,而还处于生长阶段的小龄级的侧柏、刺槐、白榆的冠幅年平均生长量则是最大的。10号样地的樟子松的单株年平均生长量、林分年平均生长量和年平均净生产力都是最高的。通过综合评价樟子松林的生长状况表现最好,但该林分密度比较小。

4. 通过对不同类型人工林林下植物物种多样性的分析,得出黄羊滩人工林林下层次单一,草本植物也只有在雨季时才重新萌发,且种类较少,在所调查的16块样地共有植物31种,隶属15个科,主要集中在豆科、菊科、禾本科这三个科中。在样方中出现最多的前三种植物种类为飞蓬、胡枝子、狗尾草。而黄羊滩地区共有植物92科、288属、527种。由此看出:黄羊滩人工林下的植物多样性还很低,因在人工林中大量引入乡土物种,以提高人工林的物种多样性。

5. 用灰色关联度分析法对不同类型人工林的稳定性进行了综合评价,最稳定的为5号样地的小叶杨杏树混交林地和10号样地的樟子松纯林;相对稳定为1号样地的小叶杨刺槐混交林、12号样地的17年生侧柏纯林、7号样地的15年生杨树纯林、11号样地的柠条纯林、6号样地的13年生白榆纯林、3号样地的7年生白榆纯林、4

号样地的 9 年生小叶杨纯林、15 号样地的小美旱杨纯林、16 号样地的新疆杨纯林；相对中等稳定的为 2 号样地的 5 年生刺槐纯林、9 号样地的沙枣纯林、13 号样地的 7 年生侧柏纯林、14 号样地的紫穗槐樟子松混交林；不稳定的为 8 号样地的黄柳纯林。

6. 针对黄羊滩人工林的现状提出对人工林进行水分管理、立地管理、优化群落结构、人工促进天然更新、考虑人文因子等因素， 从而提高人工林的稳定性。

关键词：黄羊滩；人工林；稳定性；生态系统管理

Study on the major characters and stability of managed ecosystem in Huangyangtan

Author: Fu Xiaoyan

Specialty: Forest management

Tutor: Huang Xuanrui

Abstract

Desertification is one of the biggest environment questions in the world, which also is the main manifestation of desertification in the north of our country. In recent years, the sandstorm occurred frequently, which has done a great harm to ecological environment. Yanghe sandy land is one of the important dust sources of Beijing and Tianjing sandstorm source, located at Zhangjiakou area, Hebei province. To combat the wind sand disaster, in recent years this area has made ecological construction cosmically and gained favorable effects. This paper takes Huangyangtan sandy land as example, based on a mass of research and observation, Using grey relational analysis method, from the physical properties of soil, soil chemical properties, the growth of forest, forest plant diversity, comprehensive quantitative evaluation of different types of plantation stability, and for the region to improve the status of Plantation stability of the measures and silvicultural measures. The result indicated:

(1) Through determination and analysis the Huangyangtan physical properties of soil, we can see: the different types of plantations, The comparison of soil aggregate composition is very greatly. In the composition of the soil particles, 1 ~ 0.1 mm particles formed in the percentage of between 34.63 to 96.01 percent, the soil is composed of machinery as a percentage of the maximum. Soil particles larger than 0.05 mm of the particle composition of the total of 87.98 percent, this component can be seen from the Huangyangtan region of sandy soil in plantations still quite serious. We selected in the water holding capacity of soil and retention indicators, soil bulk density in 1.43 ~ 1.68 g/cm³ between the soil in the field capacity between 14.94 to 24.88 percent, water retention and retention is relatively weak, and the soil containing Water only between 3.74 to 6.68 percent, relatively low moisture levels, and between all levels of soil moisture changes were not evident.

(2) Huangyangtan region due to relatively large annual sandstorms, litter the ground floor of relatively small, resulting in the area of soil organic matter content of low organic matter content of the highest kind for the 5th kind of poplar and apricot mixed for 7.812 g / kg, the smallest on the 14th for the kind of *Amorpha fruticosa* × the Scotch Pine mixed shrub land of organic matter content of 1.488 g / kg. Through comprehensive evaluation on

the 5th kind of poplar and apricot mixed forest is the highest correlation coefficient of soil nutrients, soil nutrient status of the best.

(3) Through the Huangyangtan different plantation growth, the average growth of trees of *Populus popular s* and *Populus alba* L.var.pyramidalis are the largest, and still in the growth stage of the age class of small oriental arborvitae, black locust, elm's crown The average annual growth rate of crown is the largest. On the 10th of the kind of Scots pine, the average growth of plants, stand-year average and the average annual growth of net productivity are the highest. Scots Pine Forest through a comprehensive evaluation of the best growth conditions, but the stand density is relatively small.

(4) Through the different types of plantation forest diversity of plant species, forest plantations that Huangyangtan a single level, herbs only during the rainy season when the re-germination, and less variety in the investigation of the 16 samples And a total of 31 kinds of plants, under Section 15. Mainly concentrated in the legume, Compositae, the three branches of the grass family. In a kind arguably the largest number of plant species for the first three Feipeng, Lespedeza, green bristlegrass. Huangyangtan region and a total of 92 branches, 288 genera and 527 kinds. This see: Huangyangtan Plantation under the plant diversity is also low, due in large plantations in the introduction of native species, to raise plantations of species diversity .

(5) Evaluated the plantations with ash association coethcient analysis, the result that the plot 5, Poplar × A pricot mixed forest and plot 10 *Amorpha fruticosa* forest, are the most stability forest stands. The relatively stability plantations are the polt 1 poplar × *Robinia pseudoacacia* mixed forest, plot 12 *Platycladus orientalis* of 17 years, plot 7 Poplar, plot 11 *Caragana korshinskii* Kom, plot 6 elm trees of 13 yeas,plot 3 elm trees of 7 years, plot 4 Poplar of 9 year, plot 15 *Populus popular s*, plot 16 *Populus alba* L.var.pyramidalis,The relatively middle stability plantations are plot 2 *Robinia pseudoacacia* of 5 years, plot 9 *Elaeagnus angustifolia* L, plot 13 *Platycladus orientalis* of 7 years, plot 14 *Amorpha fruticosa* × the Scotch Pine, The instability plantations is plot 8 *Salix psammophila*.

(6) Aim at the plantations in Huangyangtan, take measures by water and site management, optimize community structure, man-promoted natural regeneration, humanity factor, enhancing the stability of plantations.

Key words: Huangyangtan; Plantation; stability; Ecosystem management

独创性声明

本人声明所呈交的学位论文是本人在导师指导下进行的研究工作及取得的研究成果。据我所知，除了文中特别加以标注和致谢的地方外，论文中不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果，也不包含为获得 河北农业大学 或其他教育机构的学位或证书而使用过的材料。与我一同工作的同志对本研究所做的任何贡献均已在论文中作了明确的说明并表示谢意。

学位论文作者签名：付晓燕 签字日期：2008 年 6 月 6 日

学位论文版权使用授权书

本学位论文作者完全了解 河北农业大学 有关保留、使用学位论文的规定，有权保留并向国家有关部门或机构送交论文的复印件和磁盘，允许论文被查阅和借阅。本人授权 河北农业大学 可以将学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索，可以采用影印、缩印或扫描等复制手段保存、汇编学位论文。

（保密的学位论文在解密后适用本授权书）

学位论文作者签名：付晓燕

导师签名：董选瑞

签字日期：2008 年 6 月 6 日

签字日期：2008 年 6 月 6 日

学位论文作者毕业后去向：

工作单位：

电话：

通讯地址：

邮编：

1 引言

土地荒漠化,已经成为国际社会普遍关注的重大生态环境问题。中国是一个植被覆盖率相对较低、水土流失严重和土地荒漠化持续扩展的国家,近年来随着林业六大工程的逐步实施,森林面积逐年扩大、生态环境逐步好转。值得注意的是,在人工造林过程中,由于自然和人为因素的影响,特别是造林树种,以及造林模式选择不当等,人工林不稳定现象也逐渐表现出来。主要表现在:一是人工林稳定性差,许多林分随着树木的生长,林分生长状况表现越来越差,甚至出现自然死亡或者生长衰退现象;二是抵御异常气候变化能力弱。由于相当数量人工林营造所在区域,地处于半干旱地区,受到异常气候影响,连续干旱、少雨,致使大面积人工林死亡。三是易遭病虫害危害;四是由于造林模式选择不当,特别是树种连栽,易产生地力衰退;五是,在森林营造过程中,相对忽视乡土树种的营造,导致一定面积森林生态系统自身退化。因此,如何提高人工林的稳定性和生产力是生态环境重建的需求热点^[1]。但到目前为止从大量的文献中可以看出,稳定性的研究大多集中在天然林,而对人工林的稳定性研究却很少,因此对人工林的稳定性进行研究是十分必要的。

黄羊滩沙地,位于永定河上游洋河流域,总面积 133.3hm²,该沙地主要由流动、半流动和固定沙丘构成。黄羊滩沙地距北京直线距离 138 km,距官厅水库仅 55km。由于地处北京市西北方向上风口,每年冬春季节发生的沙尘暴,不仅使当地居民深受其害,并且成为直接影响京城的重要沙尘暴发源地之一。源于浑善达克沙地边缘的沙尘暴途经北京周边地区后得到了明显的加强,并指出这与北京西部小型沙地等分散沙尘源有关^[2]。黄羊滩沙地是内蒙古风沙入侵北京的入口之一,对北京沙尘天气的形成也有一定影响^[3]。而通过人工措施保护、恢复、改造、建设植被是防治土地荒漠化最有效、最经济、最持久、最稳定的措施^[4]。

近年来,随着黄羊滩沙地人工造林面积不断扩大、土地沙化现象得到一定程度遏制,人工生态系统的建立和完善,正在发挥出越来越大的作用。在人为和自然双重作用影响下,现有人工生态系统中,不仅不同植被类型稳定性存在较大差异,而且生态环境服务功能也存在一定差异。为此,在国内外森林生态系统稳定性研究成果系统总结的基础上,以黄羊滩人工生态系统为对象,研究与分析不同植被类型生产力、生物多样性之间的差异,以及对于土壤水肥变化、人工生态系统基本特征等进行深入研究,在此基础上,对黄羊滩沙地人工生态系统稳定性进行科学分类评价,从而构建起黄羊滩人工生态系统管理模式,对实现黄羊滩地区生态、经济、社会的可持续发展,以及其它地区沙化土地的治理提供参考模式,加快河北及北京防沙治沙建设步伐,根治北京地区的风沙危害,促进首都的生态建设以及推动 2008 年绿色奥运的顺利实施具有根本性意义。

2 国内外研究进展

2.1 生态系统稳定性

2.1.1 稳定性的概念、内涵与外延

(1) 稳定性的概念

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, 是一个基于热力学原理的概念^[5]。

MacArthur(1955)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^[6]。Elton(1958)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^[7]。但生态系统稳定性的概念一般包括:

A. 抵抗力(resistance): 是描述群落免受外界干扰而保持原状的能力;

B. 恢复力(resilience): 是描述群落受到外界干扰后回到原来状态的能力; C. 持久性(persistence)指一个系统或系统的某些组分持续生存的时间;

D. 变异性(variability): 是一个系统在给予扰动后种群密度随时间变化的大小^[8-9]。

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。

(2) 稳定性的内涵

对于稳定性的内涵, 不同学者也有不同的理解。周集中、马世骏(1990)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 2 个描述性概念, 没有涉及生态系统应付外界干扰的能力^[10]。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(1994)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^[11]。这种理解似乎更具合理性, 但没有反映出不同性质扰动下响应的内涵。王国宏(2002)把稳定性的 4 个内涵理解为: 对于受非正常外力(如受火烧、异常干旱、水灾、病虫害和人类活动等)干扰的系统而言, 抵抗力和恢复力是测度其稳定性的主要指标, 对于受环境正常波动干扰的系统而言, 持久性和变异性是衡量系统稳定性的指标。那些能适应环境因子的自然波动, 并能保持其自身生存与繁衍的系统就是稳定的生态系统^[5]。

(3) 稳定性的外延

稳定性的外延包括:

A. 局部稳定性(local stability): 系统受较小的扰动后仍能回复到原来的平衡点, 而受到较大的扰动后则无法回复到原来的平衡点, 则称该平衡点的稳定为局部稳定, 或邻域稳定(neighbourhood stability)^[12]。处于演替初期的群落常常如此。

B. 全局稳定性(global stability): 系统受到较大的扰动后远离平衡点, 但最终仍

能恢复

到原来的平衡点, 则该系统具有全局稳定性, 处于演替末期的群落常常如此。

C. 结构稳定(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^[13], 以此强调系统组成的有序性。

D. 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^[13]。是具循环演替的生态系统的另一种稳定形式。

E. 轨道稳定性(trajecory 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复归至某一最终状态的倾向^[14]。是具有逆行演替的生态系统的特殊稳定形式。

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

G. 绝对稳定性(absolute stability): 反映邻域稳定和全局稳定的质的概念, 因为在稳定域内外的系统状态有质的区别^[11, 15]。

从以上关于稳定性的各种不同的概念可以看出, 虽然稳定性有非常重要的意义, 但是稳定性在概念上还是很混乱的, 造成了对研究系统稳定性的混乱。到目前为止, 生态系统的稳定性也非常含混, Hill 认为: “生态系统的稳定性的概念不仅复杂, 而且经常被人们用一些含糊不清的术语所研讨”^[15]。

2.1.2 多样性——稳定性理论

自从 MacArthe 和 Elton 建立多样性增加稳定性的理论后, 在很长一段时间里该理论被视为生态学的“金科玉律”, 甚至称为“核心准则”。一直到 20 世纪 70 年代初期, Garde 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^[16]。May 进一步扩充和完善了这个结论, 他认为作为数学上的一个常识, 复杂性的增加, 将不可避免地削弱系统的稳定性。而在一个没有合适系统的自然界, 稳定性不可能肯定与营养水平的复杂性以及植物与动物的多样性有关^[17]。其后 Goodman^[18]和 Pimm^[19]指出生态系统多样性和稳定性之间并不存在着简单的相关关系。然而有人认为 May 的理论的最大缺陷是没有考虑真实生态系统的调节机制, 而且生态系统往往是远离平衡的, 因而与一般的系统相差甚远^[11]。况且理论模型只能涉及有限的几个物种, 而一个真实生态系统包含的物种要多得多。也有人认为理论生态学家和生物生态学家研究的是两个不同性质的问题, 理论模型研究的是系统的自激(self-generating)不稳定性, 即在小的干扰引发下, 系统对系统本身所产生振荡进行的负反馈调节。而生物生态学家研究的问题是生态系统作为整体对外界的抗干扰能力^[20]。Doak 等人则提出多样性导致稳定性只是统计学上的必然结果, 而非它们之间的必然联系^[16]有关实验的证据也有两种不同的结果, 一种结果支持多样性导致稳定性的理论^[21-24]。例如 Frank 等在黄石公园草地做了试验研究后得出植物群落种类成分稳定性随多样性增加而增加, 对于旱引起的种类成

分的变化也与植物群落的多样性成正比;另一种结果则倾向于否定^[25-28]。例如 Hurd 的由植物、草食动物和肉食动物构成的三级食物网的实验得出,在植物和草食动物营养级上多样性的增加,都会导致更高一级营养级的不稳定。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。最显著的特点是 McCann 使用的模型和 May 的模型有不同的结构,增加了更多合理的生物学假设:

第一,和传统的 Lotka-Volterra 模型不同的是,他们加上了非线性项;

第二,他们不假设系统处在平衡态,从而不必去寻找稳定的平衡点,代之去寻找“吸引子”使种群波动减弱,减少了种群绝灭的概率;

第三,模型的非线性项考虑了很多真实的取食行为,例如捕食者不能同时对很多猎物维持很高的捕食率,这个较为实际的假设将防止捕食者驱使某一特定的猎物种走向灭绝,这是一个增加系统稳定性的因素^[29]。

Polis 认为 McCann 等建立了一套“创新性的模型”,表明“复杂性使系统趋向稳定”,从而消除了多年来理论生态学家和经验生态学家的隔阂^[30]。Pelletier 重新考虑了多物种的 Lotka-Volterra 模型后指出该模型缺乏对捕食者可能行为的考虑。即猎物相对多度降低后捕食者将对另一些猎物加大捕食。通过研究包含捕食者转移(Predator switching)的模型后, Pelletier 得出一个大的复杂的生态系统在本质上更稳定^[31]。这个结论和 McCann et al 的结论一致。当然这也许还不是争论的最后结论,但毕竟使问题的解决向前迈进了一大步。

2.1.3 稳定性的测定与评价

由于生态系统在结构、功能上的复杂性及在时空上的动态变化,加上稳定性表达的多样化,使得生态系统稳定性的度量变得非常困难,至今还没有一个统一的指标来表达生态系统的稳定性。动物生态学家用干扰前后种群密度的变化来表达动物群落的稳定性。丛建国用同一年中多样性的变异系数(D_s/D_n)来描述群落稳定性,其中 D_s 为标准差, D_n 为平均值。如果变异系数小,则在相同干扰下群落抗外界干扰能力强,自控力强,便更稳定一些^[32]。刘德广用 S_s/S_i (S_s 为物种数, S_i 为个体数)及 S_n/Sp (S_n 为天敌种数, Sp 为植食性昆虫数)两个指数来反映群落稳定性。 S_s/S_i 值越大说明物种数相对较多,而个数相对少,反映种间数量上的制约作用。 S_n/Sp 大说明天敌所占比例增加,反映食物网关系的复杂性及相互制约程度大,从而使稳定性增强^[33]。植物生态学家用干扰前后物种的组成、频度、盖度、丰富度、生物量的变化来进行群落稳定性测度。变异系数 $CV(\%) = \text{标准差} / \text{多年生物量平均值}$, 常被用来衡量植物群落稳定性^[34-36]。

生态学家在研究中提出了一些稳定性测度的方法,但这些方法都有不同程度的缺陷,无法有效地应用于实际生态系统稳定性的评价。因此,针对具体不同的生态系统,许多研究者提出了各自的稳定性评价指标。Odum 给出了稳定的生态系统在群落的能

量、群落结构、营养物质循环、生活史等七个方面 22 项指标的特征。这七个方面的 22 项指标分别代表着系统的结构、功能和能流状态^[37]。马世骏、王如松提出把社会、经济、自然三个方面结合起来评价生态系统稳定性,研究认为:社会、经济、自然虽然是三个不同性质的系统,但其各自的生存和发展都受到其他系统结构和功能的制约,因此必须作为一个复合生态系统来考虑。衡量社会、经济、自然复合系统的三个指标为:自然系统的合理性、经济系统的利润性和社会系统的效益性。这三个指标同时也是衡量该复合生态系统稳定性的重要特征^[38],曾德慧在樟子松人工固沙林稳定性研究中给出了人工林稳定性的内涵并提出了评价标准,主要包括:人工林能否顺利成活、能否正常生长,寿命长短、对不良环境的抗御能力、林分结构是否合理、林分的生产力大小等^[39]。曹文志在评价区域农业生态系统稳定性时根据该系统结构的适宜性、功能的稳定性及物质和能量输出输入的平衡状态等三个方面提出了 18 项评价其稳定性的指标,主要有:多样性指数、相对优势度、相对丰富度、林地面积比重系数、人均土地面积、人均耕地面积、粮食转化系数、节粮型肉类比重、生产力指数、光能转化率、抗逆性指数、耕地产出率、劳动生产率、投入产出系数、氮投入产出系数、磷投入产出系数、钾投入产出系数、其他物质投入产出系数等^[40]。吴延熊等在研究区域森林资源系统稳定性的预警分析时给出 10 个评价指标,分别为:系统产出扰动度、系统输入扰动度、系统产值优势度、稳定性综合指数、系统产值离异度、系统生物受容度、系统产值振动度、交叉替代子结构可塑性、收入弹性系数、输出弹性系数等^[41]。李小秀在评价北京山区生态系统稳定性时从水土流失程度、生态稳定度、环境污染、农业生态四个方面,提出了 14 项评价其稳定性的指标,具体为:地貌、气候、地表物质、植被覆盖度、生物多样性指数、保护区面积占国土率、自然灾害类型、大气环境质量、水环境质量、土壤环境质量、农药使用量、生态能源结构、污水灌溉率、农膜使用量等^[42]。

稳定性是群落或生态系统存在的首要条件和最基本表征之一。由于稳定性不仅与群落或生态系统结构、功能和进化特征有关,而且与外界干扰的强度有关,因而稳定性是一个比较复杂的问题。人们从不同的角度来研究生态系统的稳定性,但到目前为止,对稳定性及其影响机制还没有一个统一的认识。这给在现实中评价一个生态系统是否为稳定的生态系统带来了不便。因此我们有必要根据功能的不同把防风固沙人工林生态系统区分出来,来确定稳定性的具体内涵,并以此为依据来描述稳定性具体的指标和标准。

2.1.4 稳定性的研究方法

在现代生态学中,研究稳定性主要有 2 类基本的方法。第 1 类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2类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^[36,38]。

2.2 森林生态系统的稳定性

2.2.1 天然林生态系统稳定性

从大量的文献中可以看出,对稳定性的研究大多集中在天然林。其测度方法及其指标体系都是根据具体的研究对象来确定。即使同一学者在研究不同对象时,所采用的稳定性测度方法也不一样,但他们主要是依据以下几个理论为基础即:多样性理论、冗余理论、信息网络、反控制理论等^[7]。Macarthur用Shannon-Weaver指数来描述营养水平多样性作为稳定性的度量,即 $H' = -\sum P_i \lg P_i$,式中 P_i 是指食物网中通过第 i 条通道的比例。但他并没有给出稳定性的确切定义,也没有证明营养水平多样性与稳定性的关系。实际上,他讲的稳定性是指抵抗性,他解释的稳定性机制是捕食者对猎物的转换行为。具有代表性的稳定性测度方法有以下2种:

第一, M. Godron 稳定性测定方法。此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进行排列,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处连一自线,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^[7,43-44]。

第二,演替与比较相结合的方法。郑元润^[7,36]运用阳含熙先生的转移概率公式即 $P_{ij} = \text{种 } i \text{ 林冠下种 } j \text{ 断面积之和} / \text{种 } i \text{ 林冠下全部断面积之和}$ 。对于线性演替,转移概率确定后,就要求出平衡时的物种组成比例。将平衡时各种群所占的比例与现状各种群所占的比例作比较分析。若两者结果一致,可认为现状群落分布状态接近于稳定时群落数量分布状态,则群落是稳定的;否则,群落分布状态与稳定时群落数量分布状态存在差异,群落正处于演替过程的不稳定状态之中。

M. Godron 稳定性测定方法仅能提供群落稳定与否的信息,而演替与比较相结合的方法还可以说明群落的演替方向及趋势,是研究森林植物群落较为有效的方法。另外,彭少麟^[45]采用植物群落的年龄结构来分析群落的稳定性问题。生态学家岳天祥、马世骏^[46]将热力学稳定性理论应用于生态系统的研究,为稳定性的研究提供了一条新的途径。李树人^[47]赵勇^[48]等应用主成分分析、模糊聚类 and 逐步回归等多元统计的方

法在对河南省森林生态模型划分的基础上,对全省范围内森林生态系统的稳定性进行了研究。郑元润^[49]在研究生命表及生殖生态学的基础上,采用种群生态学的反馈调节原理进行沙地云杉种群稳定性的研究。李旭光^[50]等运用种群动态模型通过建立描述种群的幼苗、幼树群和成年个体群之间盖度数量关系,然后输入各项参数值来分析大头茶种群稳定性。吴明作^[51]等用色谱分析法来研究栓皮栎种群动态稳定性的分析。

从以上可以看出,稳定性研究方法总是根据所研究的对象(如一个种群,群落或生态系统等)的某一方面的特征来进行,如种类成分、种群密度、生产力以及其它各功能过程上的稳定性。在描述稳定性特征方面研究最多的是种类组成以及种群密度。这可能主要是受到技术的限制和研究方法可操作性的影响。导致上述的种种原因可能是对稳定性的形成机制还没有达成共识。在稳定性指标体系方面,没有一个具体的可操作性框架。一般认为,衡量植物群落稳定性最重要的指标是物种组成和结构,然而,植物群落如何通过物种组成和结构来维持其稳定性,一直没有获得满意的答案^[52-53]。周集中、马世骏^[10]认为稳定性与生态序(要素序、结构序、功能序、空间序、时间序、环境因子序)有着非常密切的关系。稳定性是生态系统的一个综合特征,它只能根据与生态系统具体特征相关的某些实验结果来推断。生态系统稳定性指标体系必须涉及到生态系统组织程度的度量。他们根据稳定性的各个方面(抵抗性、恢复性、弹性、变异性、替代性、振幅)以及生态序的各种不同类型,构造一个矩阵(稳定性指标体系矩阵)来表征它们之间的相互关系,并可进一步构造某些综合指标来描述生态系统的总稳定性。这为我们评价生态系统稳定性提供了一条思路。

2.2.2 人工林生态系统稳定性

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^[54]。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^[56]。截止 2007 年 9 月,我国人工林保存面积超过 5364.99 万 hm^2 , 占世界人工林面积的近 1/3, 居世界第一位^[55]。自从 1992 年世界环境与发展大会,特别是 1997 年第 11 届世界林业大会以来,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。因此,人工林的稳定性问题也受到林业工作者的高度重视。人工林生态系统是森林生态系统的一种类型。人工林稳定性的内涵,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。不同的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。比较早的有马兴洲(1986)把刺槐的保存率、干梢率和林相不齐等作为衡量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^[57]。曾德慧等(1996)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。他们认为,人工林稳定性的内涵应理解为: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。他们从以下 6 个方面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^[1]。

王豁然(1998)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 3 个方面的合理运用及互作效应。他把生态标准与指标、社会经济标准与指标、环境与美学价值标准与指标等作为外来树种人工林稳定性的评价标准^[58]。盛炜彤(2001)从另一个角度提出了人工林不稳定性 3 个方面的表现:

- (1)抵御异常气候变化能力弱;
- (2)易遭病虫害攻击;
- (3)易产生地力衰退^[55]。

冯耀宗(2002)通过 40 余年来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,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:

- (1)系统生产力动态;
- (2)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);
- (3)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^[59]。

姜风歧等(2002)对科尔沁沙地主要人工固沙林群落稳定性进行了评价,认为稳定的群落持续发挥防风固沙作用的前提下,应具备以下条件:

- (1)适合当地环境条件;
- (2)对外界干扰的抵抗性和恢复性;
- (3)正常生长发育和自我更新能力;
- (4)有较为完善的种群结构^[44]。

人工生态系统是在人类对自然生态系统了解、认识的基础上,通过一定的科学手段(生态的、遗传的、生物化学的等)和经济手段(以经济效益最大化为目的)进行人工设计、建造、调整与控制的生态系统,例如农田、人工林、人工草地、鱼塘、人工湖泊(水库)等^[60]。严以绥论述了耗散结构理论在绿洲人工生态系统管理中的应用,推动了荒漠绿洲地区经济的持续发展^[61]。聂华林在分析我国西部地区 P P E 怪圈(“贫困—人口—环境”怪圈)形成的机制时发现生态发展应是西部地区走出 P P E 怪圈的首选环节^[60]。并就人工生态系统设计和生态管理对促进生态发展的意义和内涵进行了探讨,提出了人工生态系统设计和生态管理的原则、思路和措施。人工生态系统管理

首先是一种生态系统的管理,它针对人工生态系统而言,但在实际研究中要考虑的不仅仅是人工生态系统。目前,国内外对于人工生态系统管理的研究主要集中在以下 8 个方面:

- (1) 人工生态系统的生态学完整性与边界和时空尺度;
- (2) 人工生态系统的结构、功能与生态系统整体性;
- (3) 人工生态系统演替与系统动力学特性;
- (4) 人工生态系统的干扰与系统稳定性;
- (5) 人工生态系统的复杂性与不确定性;
- (6) 人工生态系统的多样性与可持续经营;
- (7) 生态模型与数据收集和监测;
- (8) 人类活动对人工生态系统的影响等^[62]。

在我国已建立了多个生态定位站,进行人工生态系统管理方面的研究。比如中科院湖南会同站,是长期从事杉木人工林生态系统的定位研究。中国林科院大岗山森林生态系统研究站在人工林生态系统的结构和功能规律、人工林多样性和稳定性、人工林可持续经营等方面进行了深入的研究。

2.2.3 森林生态系统稳定性研究的发展趋势

综上所述,稳定性是群落或生态系统存在的首要条件和最基本表征之一。由于稳定性不仅与群落或生态系统结构、功能和进化特征有关,而且与外界干扰的强度有关,因而稳定性是一个比较复杂的问题。人们从不同的角度来研究生态系统的稳定性,但到目前为止,对稳定性及其影响机制还没有一个统一的认识。这给在现实中评价一个生态系统是否为稳定的生态系统带来了不便。以后的森林生态系统稳定性研究,在思路更趋向于区分不同生态系统类型、不同的研究目的,在充分调查研究的基础上,来确定稳定性的具体内涵,并以此为依据来描述稳定性具体的指标和标准;在方法上应将生物生态学方法与数学生态学方法相结合。既要进行野外调查又要建立数学模型,使两者达到最优的磨合,实现稳定性评价由定性向定量转化;在稳定性的内涵上,要深刻理解系统的抵抗力和恢复力,持续性与变异性等稳定性特征,综合评价这些驱动或控制稳定性因子;在稳定性机制上,要丰富和完善多样性理论、反馈控制理论、信息理论、信息网络、冗余理论等。我们相信,随着科学的发展,对于稳定性的研究一定会有一个全面的认识^[63]。

3 研究地区概况

3.1 地理位置

黄羊滩沙地位于河北省张家口市宣化县境内，地理坐标为东经 $115^{\circ}2'34''\sim115^{\circ}12'30''$ ，北纬 $40^{\circ}25'12''\sim40^{\circ}32'6''$ ，总面积 10200 hm^2 。属坝下中低山区，距北京和官厅水库直线距离分别只有 138 km 和 50 km ，距宣化县城 7.5 km 。

3.2 地形地貌

黄羊滩沙地系恒山山脉小五台山的分支，属冀西北山地之低中山区，海拔高度 $580\sim1708.9\text{ m}$ ，黄羊滩沙地整体地势东南高、西北低，背靠黄羊山，为陡峭的石质山地，属恒山山脉小五台山余脉，主峰黄羊山海拔 1708.9 m ，隔山与琢鹿交界，北部为洋河水库，黄羊山与洋河水库之间主要由流动沙丘(地)、半固定沙地和固定沙地组成，间或有部分黄土沟壑，地形比较破碎。西北及北部为平地或阶地，地势较平坦。东西长 13.7 km ，南北宽 12.9 km ，但南北间海拔高度由 1708.9 m 突降到 580 m ，落差达 1128 m 。整体地势东南缘山高坡陡，自东南往西北地势由高变低。由于受第三纪以来喜马拉雅山造山运动的影响，经过长期的风化剥蚀、雨水冲蚀和近代堆积作用，形成了集山地丘陵、黄土沟壑、风蚀沙地和河谷阶地为一体的景观类型。黄羊滩沙地阶梯状地貌明显，根据地貌特征，自东南向西北可划分出三个地貌类型区：即构造剥蚀地形、风积沙地和冲积洪积扇地形，随海拔高度的降低依次排列。

构造剥蚀地貌类型面积为 2000 hm^2 ，主要分布在沙地的东南部，为黄羊山主脉两侧的岩石裸露地区，呈 NE~SW 向展布，山体由元古界白云岩和侏罗系碎屑岩构成，在地质构造的作用下并经受长期的风蚀和水蚀，形成陡峭的鳍状山峰和 V 字型沟谷，海拔高度 $900\sim1708.9\text{ m}$ ，相对高差 808.9 m ，平均坡度 $30\sim60^{\circ}$ 。山体与该地区主风西北风近似垂直，对于减少黄羊滩沙尘暴源区释放量具有一定作用，客观上起到了天然屏障的作用。其中黄羊山主峰山体突起，海拔高度达 1708.9 m ，山腹以上多为悬崖峭壁，岩石裸露，山腹以下地势趋于平缓。

风成堆积沙地面积 7540 hm^2 ，海拔 800 m 以下，位于黄羊山与洋河水库之间，形成波状起伏的流动沙丘、半固定沙地和固定沙地相间的景观类型。黄羊滩沙地在河北省的五个沙滩中面积最大，加上其所处的特殊地理位置，直接威胁京津地区的生态安全。

冲洪积扇地形位于黄羊滩沙地的北部，主要在许家堡东部地带，面积达 660 hm^2 ，是黄羊滩沙地形成的物质基础。

3.3 气候

黄羊滩沙地地处半湿润区向半干旱区的过渡地带,是华北到蒙新区的过渡气候类型,属大陆性季风气候。特点是雨热同期,光照充足,四季分明。表现为:春季气温回升较快,昼夜温差大,干燥多大风;夏季受太平洋气流影响,多东南风,炎热多雨,湿度较大;秋季短暂,凉爽光照足;冬季寒冷干燥漫长,在蒙古高压控制之下,盛行西北风。

该地区年均气温 7.6°C , 极端最高气温 38°C , 极端最低气温 -25.8°C , 大于等于 10°C , 年积温 $2000\sim 3400^{\circ}\text{C}$, 无霜期 130 d; 年均日照时数为 2912 h; 多年平均降雨量 361 mm, 且降雨年内分配不均, 6~8 三个月的降水量占全年降水量的 80% 以上; 年蒸发量 2000 mm, 为降雨量的 5.3 倍; 年平均风速 $2\sim 4\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, $8\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 以上大风天数 37~40 d, 尤其是春季植物枯黄季节, 降水稀少, 地表干燥疏松, 常常导致风沙灾害的发生。

3.4 水文

(1) 地表水 黄羊滩沙地的地表水资源主要来自大气降水, 境内包括洋河主要支流中的寇家沟河、东前所河、沈家坪河、沈家坪东河、六鸭沟河、六流河、六流东河等七条季节性河流, 该水系多年平均径流量为 $4.83\times 10^6\text{ m}^3$, 折合地表水径流深为 49.59 mm。

(2) 地下水 境内地下水总含量为 $4.67\times 10^6\text{ m}^3$, 主要来源于大气降水补给。境内有泉水 1 处, 年涌水量为 $0.525\times 10^6\text{ m}^3$ 。

3.5 土壤

黄羊滩沙地境内土壤主要包括三大类, 风沙土、褐土和栗钙土。其中褐土主要分布于海拔 800 m 以下的山体坡面上; 风沙土分布较为广泛, 黄羊滩沙地境内总面积的 70% 为固定、半固定沙地和流动沙丘组成, 风沙土广布其中; 栗钙土则分布于黄土坡梁、洪积扇等处。

3.6 植被

黄羊滩地区共有植物 92 科、288 属、527 种, 其中苔藓植物 1 科、1 属、1 种; 蕨类植物 6 科、7 属、11 种; 裸子植物 3 科、4 属、9 种; 被子植物、82 科、276 属、504 种, 其中双子叶植物 68 科、225 属、417 种, 单子叶植物 14 科、51 属、87 种。本区系植物属、种数在全国区系和河北省区系所占比例都是较低的, 种子植物的科数相对较高, 体现了北温带地区植物区系的特点。

黄羊滩自然资源多种多样, 从植被类型来说, 山地分布着落叶阔叶林, 滩地为旱生灌丛草原, 库区则为水生植物。并且根据地貌景观的不同, 其发育的植被也有

明显差异。黄羊滩最具特点的植被为旱生灌丛草原。蒿属、黄耆属、胡枝子属、黎属、蓼属、麻黄属、蓝刺头属、棘豆属、狗尾草属分别是黄羊滩被调查植被中的优势属,其中典型植被有差巴嘎蒿(*Artemisia halodendrom Turcz*)、蒙古岩黄耆(*Hedysarum mongolium Turcz*)、沙打旺(*Astragalus adsurgens Pall*)、达乌里黄耆(*A.dahur icus DC*)、草木樨状黄耆(*A.melilotoides fall*)、达乌里胡枝子(*Lespedeza davurica*)、沙蓬(*Agriophyllum squarrosum L.Moq*)、刺沙蓬(*Chenopodiaceae Salsola L*)、砂蓝刺头(*E.gmelinii Turcz.*)、东北木蓼(*Atrophaxis manshurica*)、中麻黄(*E.intermedia Schrenk*)、木贼麻黄(*E.equisetina Bge*)等,另有甘草(*Radix Glycyrrhizae*)、紫首楷(*Medicago sativa.L*)、旱柳(*salix matsudana Koidz.*)、胡杨(*Peuphratica Oliv*)、干枝梅(*Prunus mume Sieb*)、(二色补血草)等优良的治沙植物资源。它们大多数具有特殊的旱生、超旱生结构与生理生态特征,分别具有优良的固沙、抗旱、耐盐碱、抗风蚀沙埋的性能,是优良的固沙植物资源。这些本土固沙植物资源由黄羊滩独特的地理位置及恶劣的自然环境造就,是原生植被逐步向旱生、超旱生方向发展,与干旱的自然条件逐步适应的结果。在固定沙地、半固定沙地和流动沙地上,起着防风、固沙、降尘的作用。

3.7 社会经济情况

黄羊滩地处宣化县洋河南镇境内,与东前所羊坊、沙圪垯、大号、许家堡、汝家洼、田家房、外口泉、黄家梁比邻。境内原来有身价坪、魏家沟、殷家庄、路家碑等四个村庄已外迁,目前滩内无固定居民点。宣化县国营林场地处黄羊滩西北部,全场共有职工 25 人。但周围有辛庄子、顾家营、洋河南等乡镇自然村 30 余个,农业人口约 5 万余人,占总人口的 85%以上,人均年收入不足 2500 元,属贫穷落后地区。

黄羊滩交通便利,电力条件发展较快,滩内北部有旧宣蔚公路及环滩道路 40 余公里。黄羊滩北部有新建宣大京张两大高速公路。过洋河大桥又有京包铁路线,县、乡、村三级公路相连,动力与照明电配套,为黄羊滩治理提供了充分条件。

为了彻底改善黄羊滩地区的生态环境质量,合理利用该地区的自然资源,发展黄羊滩的经济,提高当地人民的生活水平以及北京市的绿化水平,实现当地资源、环境、经济、社会的可持续发展,中信公司投资 500 万元,用 3 年时间与宣化县政府合作,建设“中信黄羊滩万亩治沙绿色工程”,通过 3 年的实施,项目取得了显著的成效,创出冀西北干旱地区沙地造林最好成绩,被河北省列为省级沙地综合治理示范工程^[64]。

4 研究的方法

4.1 标准地的设置

从所确定的研究内容出发,针对黄羊滩地区近几年在无林地上逐渐恢复的人工林植被类型,2007年7~10月,在黄羊滩地区,按照树种、年龄和树种配置模式,对于每一种栽培模式,选择具有代表性的地段设置标准地,共设置标准地16块,标准地面积为 $20\times 30\text{m}^2$ 。标准地基本概况见表4-1。

表 4-1 标准地概况表

Tab.4-1 general situation of stands

样地号	人工林类型	年龄	初植密度 (株/hm ²)	保存密度 (株/hm ²)
1	小叶杨、刺槐混交林	15	1667	1133
2	刺槐	5	1333	933
3	白榆	7	1667	1633
4	小叶杨	9	833	433
5	小叶杨、杏树混交林	13	1333	600
6	白榆	13	1333	1100
7	小叶杨	15	1667	1583
8	黄柳	5	1333	1095
9	沙枣	7	2500	1750
10	樟子松	13	1667	517
11	柠条	5	7857	6332
12	侧柏	17	1337	883
13	侧柏	7	1667	1516
14	紫穗槐、樟子松混交林	5	6337	5580
15	小美早杨	9	1667	1300
16	新疆杨	9	1667	1366

4.2 测树因子及群落学调查

测树因子及群落学调查:在乔木林样地内分别对乔木树种进行每木检尺,测定树高、胸径、冠幅、株数,在样地内选取5个1×1 m的草本样方进行调查,记录其株数、高度、盖度、频度,同时测定林分郁闭度,选取标准样木进行树干解析,进行生物量的测定。在灌木林样地内测定灌木的穴数、株数、高度、冠幅,在样地内选取

5 个 1×1 m 的草本样方进行调查，记录其株数、高度、盖度、频度，同时测定林分郁闭度，选取标准株进行生物量的测定

4.3 土壤理化性质的测定

(1) 土壤机械组成的测定

土壤颗粒组成测定采用筛分法。

(2) 土壤容重、总孔隙度、毛管孔隙度、非毛管孔隙度、田间持水量的测定

土壤容重：采用环刀法测定。即在挖取的土壤剖面上，采用定容积的环刀（100 cm³），取原状土样，每层次中间取样，至 60 cm。将土样带回室内，在 105 ℃烘箱内烘干至恒重，待冷却后称其干重，计算土壤容重。

$$\text{土壤容重} = \frac{\text{土样烘干重 (g)}}{\text{土样体积 (cm}^3\text{)}}$$

土壤总孔隙度：土壤总的孔隙度的测定采用环刀法。将取得的土样带回室内称重后，在带孔环刀底座上垫滤纸，然后将带孔环刀底座朝下放入瓷盘中，瓷盘内注水，使所垫滤纸浸入水中，在水中置放 24 小时后，取出采土筒，稍置一分钟称其重量，计算土壤总孔隙度。

$$\text{土壤总孔隙度 (\%)} = \frac{\text{浸水24小时的带土筒重} - \text{空筒重} - \text{筒内干土重}}{\text{采土筒容积 (cm}^3\text{)}}$$

土壤毛管孔隙度：将装有饱和水分的湿土的采土筒称过重量后，静止放置 12 小时，由于重力作用，非毛管孔隙度中的水分慢慢流出，再把土壤称重，计算毛管孔隙度和非毛管孔隙度。

$$\text{土壤毛管孔隙度 (\%)} = \frac{\text{静止12小时的带土筒重} - \text{采土筒重} - \text{筒内干土重}}{\text{采土筒容积 (cm}^3\text{)}}$$

$$\text{土壤非毛管孔隙度 (\%)} = \text{土壤总孔隙度 (\%)} - \text{土壤毛管孔隙度 (\%)}$$

土壤田间持水量：土壤田间持水量测定采用环刀法。在林地用带盖的环刀按测容重方法依层次取原状土样，带回室内称重后，在带孔环刀底座上垫滤纸，然后将带孔环刀底座朝下放入瓷盘中，瓷盘内注水，使所垫滤纸浸入水中，在水中置放 48 小时后，去掉盘内的水和带孔环刀底座，盖上环刀盖，以防蒸发，在静置 3 天排除重力水后，测定其含水量，即得田间持水量。

$$\text{土壤田间持水量} = \frac{\text{静止24小时的带土筒重} - \text{采土筒} - \text{筒内干土重}}{\text{采土筒体积 (cm}^3\text{)}}$$

(3) 土壤含水率的测定

在黄羊滩沙地选择 16 个不同林分的试验地。在每个试验地内分别选设 2 个土壤

水分测定点, 测定层次为 0~15 cm、15~30 cm、30~45 cm、45~60 cm。于 2007 年 10 月进行测定。采用挖剖面取样、铝盒烘干 (105℃) 的测定方法。土壤含水量的计算:

$$\text{土壤含水量 (\%)} = \frac{(\text{土鲜重} + \text{盒重}) - (\text{土干重} + \text{盒重})}{\text{土干重}} \times 100$$

(4) 土壤有机质测定

第一步: 准确称取过 0.25 mm 筛的风干土样 0.3 g 与硬质试管底部, 加入 0.4 mol L⁻¹ K₂Cr₂O₇-H₂SO₄ 溶液 10.00 ml, 摇动试管使土体分散。在试管口加一小漏斗后, 将其放入 170℃ 磷酸液中消煮 5 分钟, 取出试管冷却后将内容物倾入 250 ml 三角瓶, 洗净试管及小漏斗, 洗涤液全部无损失移入三角瓶, 并确保三角瓶内溶液总体积在 60 ml~70 ml 范围内, 加邻菲罗林指示剂 2 滴, 用 0.2 mol L⁻¹ FeSO₄ 标准液滴定至终点, 每批样测定同时用石英砂代替土壤做空白标定。

第二步: 土壤有机质的计算:

$$\text{土壤有机质 \%} = (A - B) \times C \times 0.003 \times 1.724 \times 100 \times 1.1 / W$$

式中: A-空白标定时所耗 FeSO₄ 标准液体积(ml)

B-土样测定时所耗 FeSO₄ 标准液体积(ml)

C-FeSO₄ 标准液浓度(mol L⁻¹)

W-风干土样重(g)

(5) 土壤全氮测定

凯氏定氮法(Kjeldahl)

第一步: 称取风干土样。

第二步: 土样消煮: 将土样小心送入干燥的 50 ml 凯氏瓶底部, 加 1 ml 高锰酸钾溶液, 摇动凯氏瓶, 缓缓加入 2 ml 1:1 硫酸, 不断转动凯氏瓶, 然后放置 5 min, 再加入 1 滴锌醇。通过长颈漏斗将 0.5 g 还原铁粉送入凯氏瓶底部, 瓶口盖上小漏斗, 转动凯氏瓶, 使铁粉与酸接触, 待剧烈反应停止时, 将凯氏瓶置于电炉上缓缓加热 45 min 停火, 待凯氏瓶冷却后, 通过长颈漏斗加 2 g 加速剂和 5 ml 浓硫酸, 摇匀。将凯氏瓶倾斜置于 300 W 变温电炉上, 用小火加热, 待瓶内反应缓和时, 加强火力使消煮的土液保持微沸, 加热到部位不超过瓶中的液面。消煮至土液全部变为黄绿色, 再继续消煮 1 h。

第三步: 氨的蒸馏: 待消煮液冷却后, 用少量无离子水将消煮液定量地全部转入蒸馏器内。于 150 ml 锥形瓶中, 加入 5 ml 12% 硼酸指示剂混和液, 放在冷凝管末端, 管口置于硼酸液面以上 3~4 cm 处。向蒸馏室内缓缓加入 20 ml 10 mol L⁻¹ 氢氧化钠溶液, 通入蒸汽蒸馏, 待馏出液体积约 50 ml 时, 即蒸馏完毕。用少量 PH 为 4.5 的水洗涤冷凝管末端。用 0.005 mol L⁻¹ 硫酸标准溶液滴定馏出液由蓝绿色至刚变为红紫色。记录所用硫酸标准溶液体积。

第四步: 土壤全氮的计算:

$$\text{土壤全氮 (\%)} = (V - V_0) \times CH \times 0.014 \times 100 / m$$

式中: V-滴定试液时所用酸标准溶液的体积 (ml)

V₀-滴定空白时所用酸标准溶液体积 (ml)

CH-酸标准溶液的浓度 (mol L⁻¹)

0.014-氮原子的毫摩质量

m-烘干土样质量 (g)

(6) 土壤全磷测定

铝铈抗比色法

第一步：称取分干土壤样品 1.000 g 于 50 ml 三角瓶中，以少量水湿润，加入浓 H_2SO_4 8ml，摇匀后加入 70% HClO_4 10 滴，瓶口放置小漏斗在电炉上消煮 60min 冷却后用水将消煮液无损失的洗入 100 ml 容量瓶，定容后滤入 100 ml 三角瓶，同时做试剂空白试验。

第二步：吸取滤液 10 ml 于 50 ml 容量瓶，用水稀释至 30 ml，加二硝基酚指示剂 2 滴，用稀 NaOH 溶液和稀 H_2SO_4 ；溶液调节 PH 至溶液成微黄色。然后加入铝铈抗显色剂 5 ml 摇匀，定容。在室温高于 15℃ 的条件下放置 30min，在 751-GW 分光光度计 700 nm 处比色。

(7) 土壤全钾测定

采用氢氧化钠熔融-火焰光度法测定土壤全钾含量^[65]。称取烘干土样约 0.25 g 于坩埚内，用 95%酒精湿润，然后加 2.00 g 氢氧化钠放入高温炉加热至 450℃，保持 15min，熔融完毕后取出冷却。之后进行待测液的制备，将待测液用水定容，直接在火焰光度计上测定，记录检流计读数，然后在工作曲线上查得待测液钾浓度；以检流计读数为纵坐标，钾浓度为横坐标，绘制工作曲线。

(8) 土壤中速效氮的测定方法

第一步：称取土壤样品 2 g，均匀铺于扩散皿外室，水平轻轻旋转扩散皿，使样品铺平。称取 1g FeSO_4 置于外室，混匀。

第二步：在扩散皿内室注入 2% H_3BO_3 指示剂溶液 2 ml，在外室边缘涂上阿拉伯树脂，盖上毛玻璃，旋转数次使其完全密合，慢慢转开毛玻璃的一侧迅速注入 NaOH 溶液 10 ml 于外室，立即将毛玻璃盖严。然后放置在 40℃ 恒温烘箱中 24 小时后取出，用 0.01mol/L H_2SO_4 滴定内室的硼酸溶液吸收的氮量，滴至红紫色为止。

第三步：计算方法：速效氮(mg/g) = $(V - V_0) \times C / m \times 0.014$

式中：V、 V_0 为滴定样品和空白时消耗硫酸标准溶液的毫升数 (ml)，C 为硫酸标准溶液的浓度 (mol/L)，m 为烘干土样重

(9) 土壤中速效磷的测定方法

第一步：称取土壤样品 5 g 置于 250 ml 的三角瓶中，加 0.5 mol/L NaHCO_3 100 ml，加一勺无磷活性炭，塞紧瓶塞震荡 30 分钟后，立即用无磷滤纸过滤，将滤液接于 100 ml 的三角瓶中。

第二步：吸取滤液 10 ml 至 50 ml 的容量瓶中，同时补加 0.5 mol/L NaHCO_3 至 50 ml 容量瓶中，加 7.5 mol/L 硫酸钼锑抗混合指示剂 5 ml，充分摇匀排除 CO_2 后加水定容至刻度，再充分摇匀。30 分钟后在分光光度计上测定吸光度，根据标准曲线进行计算。

第三步：结果计算：土壤速效磷=比色液浓度 $\times$ 100/5 $\times$ 取用量倍数。

(10) 土壤中速效钾的测定方法

第一步：称取土壤样品 5 g 置于 100 ml 的三角瓶中，加 50ml 1 mol/L 中性乙酸氨溶液，塞紧橡皮塞，震荡 30 分钟。

第二步：用干的普通滤纸过滤，滤液盛于小的三角瓶中，同钾标准溶液一起在原子吸收仪上进行测定，读取读数，从标准曲线上查得结果。

第三步：计算结果：土壤速效钾=待测液浓度 $\times$ V/W

式中：V 为加入浸提剂的毫升数，W 为样品烘干重 (g)。

4.4 生物量的测定

本调查测定林分地上部分生物量。在 20 $\times$ 30 m 样地内调查，乔木和灌木分别树种按标准木法测量鲜重 W_1 ，分别主干、树枝、树叶、果实取样带回实验室烘干至恒重 W_2 ，各指标烘干后的恒重与对应的鲜重相比即为各指标的干鲜比，即干物质含量(%)= $W_2/W_1 \times 100\%$ 。草本层采用全部收获法，在对应的样地内，草本层分别选取 5 个 1 $\times$ 1m 的小样方。测定样方内所有植物的鲜重，视生物量大小可取样带回实验室烘干至恒重。推算出林分内乔、灌、草、各自的生物量。

4.5 生物多样性调查与计算

调查林下草本层的植物多样性。在每个样地及对照地上随机设置 5 个 1 $\times$ 1 m 的小样方，对样方内所有草本植物种类记录其种名、株数、高度、盖度、频度。

采用目前普遍使用的计算公式统一应用各个物种在乔、灌、草中的个体数对物种多样性进行测度^[66-69]。

(1) 丰富度指数

$$\text{Margalef 丰富度指数: } d_1 = \frac{S-1}{\ln N}$$

$$\text{Patrick 丰富度指数: } d_2 = \frac{S}{n^{-2}}$$

(2) 多样性指数

$$\text{Simpson 多样性指数: } Sp = 1 - \sum p_i^2$$

$$\text{Shanno-winner 多样性指数: } Sw = - \sum_{i=1}^s p_i \ln p_i$$

(3) 均匀度指数

$$J_D = \frac{1 - \sum P_i^2}{1 - 1/S}$$

Pielou 均匀度指数:

$$J_W = \frac{-\sum p_i \ln p_i}{\ln S}$$

注: N 为所有物种个体总数, S 为群落中物种总数, P_i 为第 i 个种的个体数占所有物种个体总数的比例。

4.6 稳定性评价

正确恰当的选取研究指标是进行分析评价的根本条件和理论基础。指标体系的构建成功与否决定了评价效果的真实性和可行性。稳定性的评价体系是由与稳定性密切相关的物种多样性、土壤、以及林分自身的生长状况等指标综合反映的, 它们之间的关系既相对独立性, 又有相互交叉的联系。因此本文通过实地调查, 按照客观、系统、科学、可行性原则, 广泛征求有关专家的意见, 经综合分析后, 主要选取与土壤物理性质、土壤化学性质、林分的生长状况和林下植物多样性有密切关系的 n 项指标, 构成黄羊滩人工林生态系统稳定性评价的指标体系。从 4 个方面用数学的方法来评价黄羊滩人工林生态系统稳定性, 即对土壤水分状况 (土壤容重、土壤水分、土壤总孔隙度、毛管孔隙度、非毛管孔隙度、土壤饱和持水量、土壤田间持水量), 土壤的改良效果 (土壤有机质、土壤全 N、全 P、全 K、速效 N、速效 P、速效 K), 林分的生长状况 (年平均树高生长量、年平均冠幅、单株年平均生物量、林分年平均生物量、年平均净生产量), 林下植物多样性状况 (样方内的物种数、物种丰富度 d_1 、 d_2 ; 物种多样性指数 Simpson 指数、Shannon-Wiener 指数; 物种均匀度指数 J_s 、 J_{sw})。采用灰色关联度分析法综合评价不同类型人工林稳定性。

4.7 灰色关联度分析法

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。灰色系统理论^[70,71,72] (Grey System Theory) 最早由华中理工大学邓聚龙教授提出。灰色系统的关联分析是系统态势的量化比较分析。灰色关联度的原理是, 若干个统计数列所构成的各条曲线几何形状越接近, 即越相平行, 则它们的变化趋势越接近, 其关联度就越大。关联序反映各评价对象对理想对象 (参考对象) 的接近次序, 即评价对象的优劣次序, 其中关联度最大的评价对象为最佳。因此, 可利用关联序对评价对象进行排序, 以对评价对象进行比较。

灰色关联度分析模型建立的步骤如下:

(1) 被评价对象数列和参考数列

参考数列 (理想对象数列) 为: $X_0 = \{X_0(1), X_0(2), \dots, X_0(n)\}$;

被评价对象数列为: $X_i = \{X_i(1), X_i(2), \dots, X_i(n)\}$, $i = 1, 2, \dots, m$ 。

(2) 关联系数

$$\xi_i(k) = \frac{\min_i \min_k |x_0(k) - x_i(k)| + \rho \max_i \max_k |x_0(k) - x_i(k)|}{|x_0(k) - x_i(k)| + \rho \max_i \max_k |x_0(k) - x_i(k)|}$$

为 x_0 与 x_i 在 k 点的关联系数。公式 $|x_0(k) - x_i(k)|$ 表示 x_0 数列与 x_i 数列在 k 点的绝对差； $\min_k |x_0(k) - x_i(k)|$ 为 x_i 与 x_0 在点 $k=1,2,\dots,n$ 上的最小绝对差，也称为一级最小差； $\min_i \min_k |x_0(k) - x_i(k)|$ 为因素 $i=1,2,\dots,n$ 上的最小绝对差，也称为二级最小差；同理， $\max_i \max_k |x_0(k) - x_i(k)|$ 为二级最大差。 ρ 为分辨系数，其取值在 0~1 之间，一般取 $\rho=0.5$ 。

(3) 关联度 (γ_i)

被评价类型与参考类型各指标的关联系数的平均值为被比较数列 X_i 与参考数列 X_0 之间的关联度。计算曲线各点的关联系数之后，按下列公式： $\gamma_i = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \xi_i(k)$ ，可求得曲线 X_i 与曲线 X_0 之间的相对关联度 γ_i ，此时所求得的仅是被评价类型与参考类型的等权关联度。但是，评价的各项指标的重要性是不同的，因此，根据各指标作用的大小，分别给以不同的权重 $W(k)$ ，按下列公式： $\gamma_i = \sum_{k=1}^n W(k) \xi_i(k)$ ， $i = 1,2,\dots,n$ 求得被评价类型与参考类型的加权关联度，通过加权关联度大小的比较，可对系统进行综合评价。

5 黄羊滩人工生态系统基本特征

5.1 土壤物理性质

5.1.1 土壤机械组成

土壤中各粒级所占的重量百分比称为土壤的机械组成。土壤机械组成直接影响着土壤的水、热、气、养分等状况和植物生长发育，加速或延缓土壤的形成过程。土壤质地、结构决定了土壤蓄水能力的强弱，进而决定了土壤水分供给的有效性。在黄羊滩地区所有的沙地都属于风蚀沙地，近几年由于植树造林力度的加大，土壤也有了一定的改善，个别地块已经开始从沙壤土逐步转化为轻壤土，土壤机械组成发生了明显的变化。

不同类型的人工林土壤机械组成的测定结果见表 5-1。可以看出，不同的样地，土壤机械组成差别很大。在各个粒级的土壤颗粒组成中，1~0.1mm 的颗粒组成百分含量最高，所有的人工林下这一组成都在 30%以上，其中大部分都在 50%以上，其中最小的是乔木林地 10 号样地的樟子松林仅为 34.63%，百分含量最高的是 8 号样地的黄柳达到了 95.58 %。土壤颗粒组成大于 0.05 mm 的占总的颗粒组成的 87.98%，从这一组成可以看出黄羊滩地区的人工林土壤沙化现象还比较严重。各林分土壤小石砾含量(>1mm)在 0~11.35%之间，总平均数为 2.30%，乔木林的平均数为 1.86%，小于总的平均数。灌木林的平均数为 3.37%，比总的平均数稍大一些。在这所调查的 16 块样地中只有 14 号样地的紫穗槐、樟子松混交林样地中粒径>1 mm 的百分含量为 0%。在土壤机械组成>1mm、1~0.1mm、0.1~0.05 mm 中，所有样地都有这 3 种组成的存在，而粒径在 0.05~0.01mm 之间的，9 号样地的沙枣，16 号样地的新疆杨，8 号样地的黄柳，14 号样地的紫穗槐、樟子松都没有这种粒径的沙粒存在，超过 50%的样地都没 0.01~0.005 mm 粉粒的存在。在所有样地中都有粒径<0.005 mm 的粘粒的存在，但所占的比例在 3.84~25.54%之间，平均值在 8.3%，所占比例比较小。总体来说，黄羊滩地区的机械组成大致可分为 3 级即：大粒径>0.1mm；中粒径 0.01~0.005mm；小粒径<0.005 mm，其中大粒径>0.01mm 的沙粒占总的机械组成的 83.09%，是黄羊滩地区主要的颗粒组成，由此可以看出，黄羊滩即使在植被恢复的地区，土壤机械组成有一定程度的改善，但仍然处于高度沙化。

表 5-1 不同林分下土壤机械组成比较

Tab. 5-1 The comparison of soil aggregate composition of arbor forest stand

样地类型	土壤颗粒组成 (%)					
	>1mm (%)	1-0.1mm (%)	0.1-0.05 mm (%)	0.05-0.01 mm (%)	0.01-0.005 mm (%)	<0.005 mm (%)
小叶杨、刺槐混交林	0.13	71.66	18.57	3.95	0	5.82
刺槐	3.23	57.81	25.52	7.90	2.97	5.80
白榆	0.16	92.30	1.88	1.98	0	3.84
小叶杨	8.48	76.01	12.20	1.99	1.98	7.82
小叶杨、杏树混交林	1.52	53.93	24.53	7.82	2.03	11.69
白榆	1.73	70.15	16.15	5.92	0	7.78
小叶杨	1.34	38.09	24.52	9.87	1.98	25.54
黄柳	3.14	95.58	0.58	0	0	3.84
沙枣	0.63	84.49	9.68	0	0	5.83
樟子松	0.85	34.63	49.72	5.91	1.97	7.77
柠条	3.44	42.6	29.95	7.87	1.97	17.61
侧柏	1.36	41.51	38.86	7.90	1.97	9.76
侧柏	2.64	80.48	9.73	1.98	1.98	5.83
紫穗槐、樟子松混交林	0	96.01	0.13	0	0	3.86
小美早杨	2.47	64.57	19.7	7.92	0	7.81
新疆杨	0.74	75.14	19.01	0	0	5.85
平均数	1.99	67.19	18.80	4.44	1.05	8.53

5.1.2 土壤容重、孔隙度和持水量

土壤容重又称土壤假比重,是衡量土壤孔隙度的重要指标,系指在自然结构状况下,单位体积内绝对干土的重量。土壤容重的大小随质地,结构性和松紧度的变化而变化。一般来讲土壤容重愈小,表明土壤比较疏松,孔隙多;反之,土壤容重愈大,表明土体紧实,结构性差,孔隙少。由表 5-2 我们可以看出各个样地的平均土壤容重灌木林 < 乔木林。黄羊滩不同植被类型下土壤容重的变化范围在 $1.43\sim 1.67\text{ g/cm}^3$ 之间,其中乔木林下的土壤容重变化幅度比较大,5 号样地的小叶杨、杏树混交林的土壤容重最小为 1.43 g/cm^3 ,9 号样地的沙枣林地土壤容重最大。这说明 5 号样地的混交林土壤结构比较疏松,孔隙比较多,因此在贫瘠的土壤上因尽量多营造混交林。

土壤中的孔隙是土壤中水分和空气的通道和存在场所。土壤孔隙度的大小,决定着土壤水分和空气的含量及通透性的好坏。土壤的通气性,保水性,透水性以及植物

根系的伸展，都受土壤孔隙度的影响。土壤质地，土粒排列松紧，土壤有机质又直接影响着土壤的孔隙度。土壤孔隙分布是土壤基质最重要的特性之一，土壤孔隙，特别是土壤大孔隙的分布直接影响土壤的持水和导水能力，以及植被根系的生长，因而研究土壤孔隙分布对不同植被类型下耗水规律有重要意义。土壤总的孔隙度在不同植被下的大小顺序为灌木植被>乔木植被，土壤总的孔隙度在 30.75~39.79%之间，其中最大的为 5 号样地的小叶杨、杏树混交林地，达到 39.79%，最小的是 9 号样地的沙枣林地，而土壤容重最小的是 5 号样地的小叶杨、杏树混交林地，最大的是 9 号样地的沙枣林地，这与土壤容重越大土壤孔隙度越小，这一变化规律相一致。

田间持水量是指降雨或灌溉后，多余的重力水已经排除，渗透水流已降至很低或基本停止时土壤所吸持的水量，用重量百分率表示。田间持水量的大小与土壤孔隙状况及有机质含量有关，粘质土壤、结构良好或富含有机质的土壤，田间持水量最大。由表 5-2 可以看出土壤田间持水量的变化范围在 14.94%~25.08%之间，最大值 25.08% 的 5 号样地的杨树、杏树混交林。

表 5-2 不同林分下的土壤（0-60cm）容重、孔隙性和持水性

Tab.5-2 The volume weight,porosity and water capacity of soil(0-60cm) in different forest stands

样地类型	土壤容重 (g/cm ³)	总孔隙度 (%)	毛管孔隙度 (%)	非毛管孔隙 度 (%)	土壤饱和持 水量 (%)	土壤田间持 水量 (%)
小叶杨、刺槐混交林	1.59	33.74	31.44	2.30	21.26	19.81
刺槐	1.61	34.01	30.38	3.62	21.20	18.93
白榆	1.56	34.20	29.28	4.92	21.99	18.83
小叶杨	1.56	35.59	32.29	3.30	22.80	20.68
小叶杨、杏树混交林	1.43	39.79	35.87	3.92	27.82	25.08
白榆	1.61	37.07	31.48	5.60	23.18	19.68
小叶杨	1.47	39.55	36.40	3.15	27.03	24.88
黄柳	1.64	32.42	19.90	24.66	7.76	14.94
沙枣	1.68	30.75	26.70	4.05	18.40	15.99
樟子松	1.55	35.91	33.27	2.65	23.31	21.60
柠条	1.47	38.04	26.36	34.43	3.61	23.88
侧柏	1.55	36.39	33.68	2.71	23.59	21.84
侧柏	1.67	30.77	28.23	2.53	18.53	17.01
紫穗槐、樟子松混交林	1.53	33.21	21.70	29.36	3.85	19.18
小美旱杨	1.53	35.59	32.31	3.27	23.45	21.31
新疆杨	1.60	33.97	30.77	3.20	21.20	19.20

5.1.3 土壤含水量

水分是土壤的一个组成部分,它既是树木生长所需水分的主要来源又是土壤中养分转化和生物活动的必需条件^[73]。土壤水分的供应情况在一定程度上控制了林木的生长及土壤中物质的转化和代谢过程,是森林土壤主要肥力因素之一。它受气象、植被、土壤理化性质及经营措施的影响,不论何种林分及土壤层次,其含水量的变化都与大气降水密切相关^[74]。在黄羊滩地区,土壤水分一直是影响当地植被恢复成败的关键因子。

外来种对土壤水分的影响,通常有两种情况:(1)当外来种植物的叶面积大或者其蒸腾作用强,那么它消耗水的量大,土壤就会由于水分过度蒸发而变干燥,如怪柳(*Tamarix pendants*)可使湿地干涸^[75]; (2)有的植物外来种可以通过减少林冠层的蒸发速率,使土壤潮湿,甚至形成沼泽,如须芒草属植物(*Andropogon*)^[75]。不同人工林不同层次土壤含水量见图 5-1~图 5-2,从图中可以看出,不同人工林各层土壤含水量不同,乔木林地总体的含水量大于灌木林地。0~15cm 土壤含水率乔木林地最高的是 2 号样地的刺槐林地,土壤含水率达到 9.14%,灌木林地最高的为 11 号样地的柠条林地,土壤含水率为 7.58%。0~15cm 乔木林地的平均含水率为 4.96%,灌木林地的平均含水率为 4.49%。在所调查的不同类型的人工林中 0~15cm 层土壤最高含水率和最低含水率之间相差 6.47%,可以看出黄羊滩地区人工林的表层的土壤含水率差距比较明显,15~30cm 层和 30~45cm 层的乔木林的平均土壤含水率与灌木林的差距比较小。45~60cm 乔木林地平均土壤含水率 3.62%比灌木木林的 4.46%小。

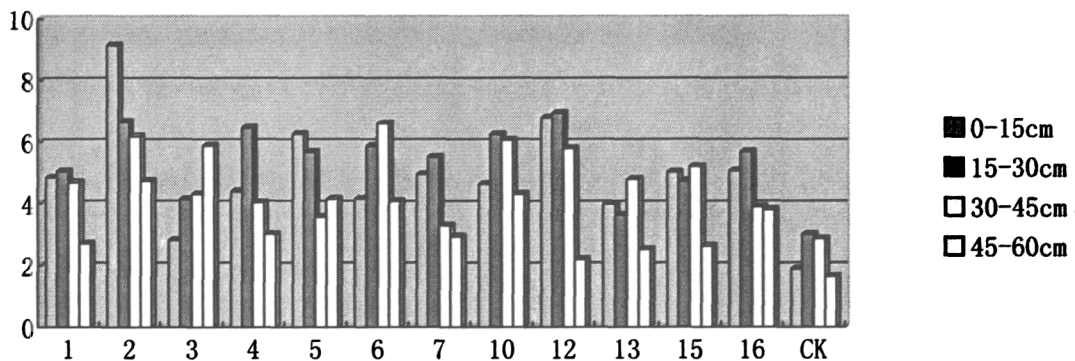


图 5-1 乔木林地下土壤含水量

Fig.5-1 The soil moisture in defferent arbor forest

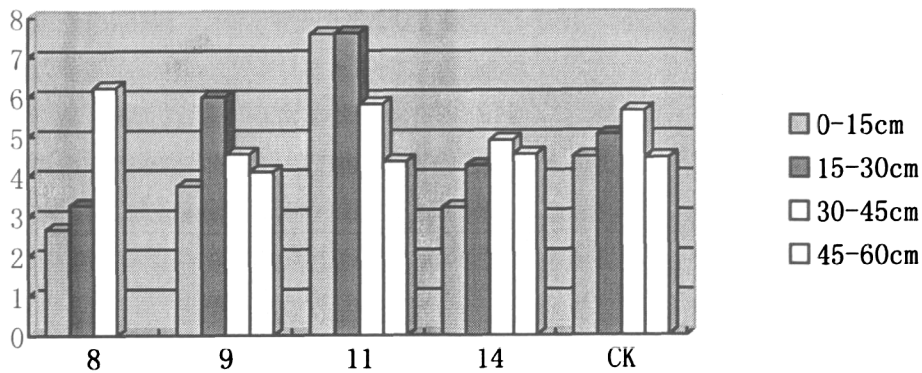
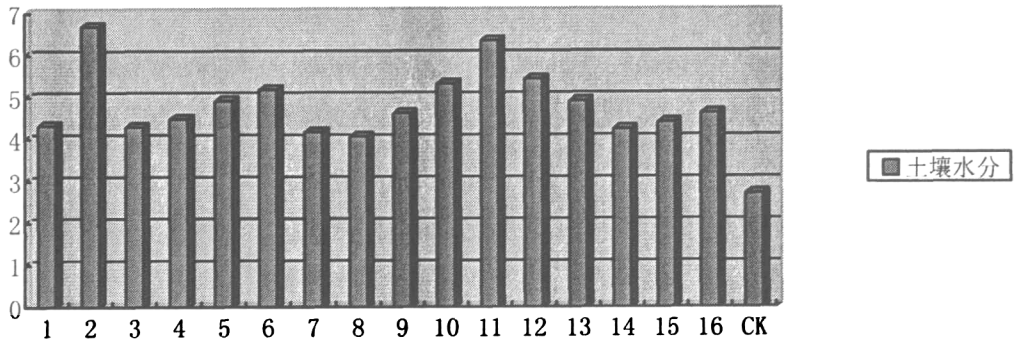


图 5-2 灌木林地下土壤含水量

Fig.5-2 The soil moisture in defferent shrub forest



图

图 5-3 不同人工林土壤平均含水量

Fig.5-3 The soil moisture in defferent forest

通过方差分析含水量与深度之间的关系 $F=1.3570$ ($F_{0.1}=2.23$) 呈非显著关系, 因此为了更好的比较不同类型的人工林的土壤含水率, 我们计算出不同层次的土壤含水率的平均值进行比较见图 5-3, 由图 5-3 可见: 2 号样地的刺槐林和 11 号样地的柠条林土壤含水率明显的高于其它样地, 而土壤含水率最小的 8 号样地的黄柳林 60cm 以下出现大量的石子。无论在乔木林还是灌木林其不同层次的土壤含水率都比对照样地高。这与余作岳等^[76]在研究广东电白县小良极度退化的生态系统时的结果一致。这说明植物外来种侵入植被稀少的退化生态系统时, 退化生态系统的植被得到恢复, 土壤理化性状得到改善, 林地土壤物理蒸发小于对照地, 发挥了森林涵养水源的作用, 使土壤水分含量增加。

5.1.4 不同人工林保水、持水性的综合评价

对土壤物理性质的评价,我们选取了土壤容重、土壤总孔隙度、土壤饱和含水量、土壤毛管孔隙度、土壤非毛管孔隙度、土壤田间持水量和土壤含水量,7个指标进行综合评价。对黄羊滩地区不同类型人工林土壤水分状况的评价。

表 5-3 不同林分下的土壤(0-60cm)容重、孔隙性和持水性标准化后结果

Tab.5-3 The standardized results of the volume weight,porosity and water capacity of soil (0-60cm) in different forest stands

样地号	平均容重	平均总孔隙度	平均饱和含水量	平均毛管孔隙度	平均非毛管孔隙度	平均田间持水量
1	0.6400	0.3308	0.6994	0.0000	0.7290	0.4803
2	0.7200	0.3606	0.6352	0.0411	0.7266	0.3935
3	0.5200	0.3816	0.5685	0.0815	0.7592	0.3836
4	0.5200	0.5354	0.7509	0.0311	0.7926	0.5661
5	0.0000	1.0000	0.9679	0.0504	1.0000	1.0000
6	0.7200	0.6991	0.7018	0.1027	0.8083	0.4675
7	0.1600	0.9735	1.0000	0.0265	0.9674	0.9803
8	0.8400	0.1847	0.0000	0.6959	0.1714	0.0000
9	1.0000	0.0000	0.4121	0.0545	0.6109	0.1036
10	0.4800	0.5708	0.8103	0.0109	0.8137	0.6568
11	0.1600	0.8064	0.3915	1.0000	0.0000	0.8817
12	0.4800	0.6239	0.8352	0.0128	0.8253	0.6805
13	0.9600	0.0022	0.5048	0.0072	0.6163	0.2041
14	0.4000	0.2721	0.1091	0.8422	0.0099	0.4181
15	0.4000	0.5354	0.7521	0.0302	0.8195	0.6282
16	0.6800	0.3562	0.6588	0.0280	0.7266	0.4201

通过灰色关联度的分析可知:表 5-3~5-4 土壤水分状况的顺序为:5 号样地的小叶杨、杏树混交林地>7 号样地的 15 年生小叶杨>11 号样地的柠条>2 号样地的 5 年生刺槐>12 号样地的 7 年生侧柏>6 号样地的白榆>10 号样地的樟子松林地>15 号样地的小美旱杨>4 号样地的 9 年生小叶杨>16 号样地的新疆杨>1 号样地的小叶杨、刺槐混交林>9 号样地的沙枣林>13 号样地的 7 年生侧柏>3 号样地的 7 年生白榆>8 号样地的黄柳林地>14 号样地的紫穗槐、樟子松林。从评价结果可以看出 5 号样地的小叶杨、杏树混交林地的土壤保持水分的能力最好。

表 5-4 不同林分下的土壤（0-60cm）容重、孔隙性和持水性关联系数

Tab.5-4 The association coefficient of the volume weight,porosity and water capacity of soil (0-60cm) in different forest stands

样地 号	平均容重	平均总空隙 度	平均饱和含 水量	平均毛管空 隙度	平均非毛管 空隙度	平均田间持 水量	关联度
1	0.5814	0.4276	0.6245	0.3333	0.6485	0.4903	0.4986
2	0.6410	0.4388	0.5781	0.3427	0.6465	0.4519	0.5856
3	0.5102	0.4471	0.5368	0.3525	0.6749	0.4479	0.4786
4	0.5102	0.5183	0.6675	0.3404	0.7069	0.5354	0.5256
5	0.3333	1.0000	0.9396	0.3449	1.0000	1.0000	0.7247
6	0.6410	0.6243	0.6264	0.3578	0.7229	0.4842	0.5645
7	0.3731	0.9496	1.0000	0.3393	0.9387	0.9620	0.7047
8	0.7576	0.3802	0.3333	0.6218	0.3763	0.3333	0.4518
9	1.0000	0.3333	0.4596	0.3459	0.5624	0.3581	0.4964
10	0.4902	0.5381	0.7250	0.3358	0.7286	0.5930	0.5614
11	0.3731	0.7209	0.4511	1.0000	0.3333	0.8086	0.6432
12	0.4902	0.5707	0.7521	0.3362	0.7410	0.6101	0.5772
13	0.9259	0.3338	0.5024	0.3349	0.5658	0.3858	0.4832
14	0.4545	0.4072	0.3595	0.7601	0.3356	0.4622	0.4507
15	0.4545	0.5183	0.6686	0.3402	0.7347	0.5735	0.5260
16	0.6098	0.4371	0.5944	0.3397	0.6465	0.4630	0.5010

5.2 土壤化学性质

5.2.1 土壤有机质

土壤有机质是林木生长所需营养的重要来源,还影响着一系列的土壤物理、化学、生物性质^[77]。它在改善土壤的物理性质、提高土壤的保肥能力以及缓冲性等方面具有重要的意义^[78-79]。对土壤有机质含量,有两种相反的结论。如王洪君等^[80]在研究落叶松人工林时发现落叶松人工林地土壤有机质含量明显低于对照地。而周厚诚等认为植被恢复过程中土壤有机质含量有明显地提高^[79]。根据 Chiaruccih 和 Diminicis 的研究,认为在贫瘠退化的生态系统里引种植物外来种会使土壤的有机质增加^[81]。

从表 5-5~表 5-8 可以看出,土壤有机质含量大小的顺序为:5 号样地的小叶杨、杏树混交林地>1 号样地的小叶杨、刺槐混交林地和 12 号样地的 17 年生侧柏林地>4 号样地的 9 年生小叶杨林地>7 号样地的 15 年生小叶杨林地>11 号样地的柠条林地>6 号样地的 13 年生白榆林地和 10 号样地的樟子松林地>12 号样地的 17 年生侧柏林地和 13 号样地的 7 年生侧柏林地>15 号样地的小美旱杨林地的和 16 号样地的新疆杨林地>3 号样地的 7 年生白榆林地>8 号样地的沙柳林地>9 号样地的沙枣林地>14 号样地的紫穗槐、樟子松林地,其中有机质含量最高的样地为 5 号样地的小叶杨、杏树混交林

地的有机质含量达到 7.812 g/kg, 其次是 1 号样地的小叶杨、刺槐混交林地和 12 号样地的 17 年生侧柏林地, 最小的为 14 号样地的紫穗槐、樟子松的混交灌木林地有机质含量仅为 1.488 g/kg.

表 5-5 黄羊滩不同植被下土壤养分含量

Tab.5-5 The soil nutrient contents in different plantations in Huangyangtan

样地类型	有机质 (g/Kg)	全 N (g/Kg)	全 P (g/Kg)	全 K (g/Kg)	速 N (mg/Kg)	速 P (mg/Kg)	速 K (mg/Kg)
小叶杨、刺槐混交林	5.208	0.590	0.278	34.040	14.742	0.617	40.700
刺槐	3.906	0.426	0.306	33.253	13.104	0.675	26.810
白榆	3.162	0.328	0.157	35.482	13.104	1.493	27.120
小叶杨	5.022	0.557	0.362	33.070	14.742	1.727	35.290
小叶杨、杏树混交林	7.812	0.573	0.367	33.463	16.380	2.895	46.500
白榆	4.092	0.491	0.334	32.624	13.104	0.500	31.090
小叶杨	4.836	0.557	0.391	32.650	9.828	0.967	34.320
黄柳	2.976	0.459	0.180	30.894	6.552	0.442	27.890
沙枣	2.046	0.426	0.288	32.939	9.828	21.194	43.150
樟子松	4.092	0.328	0.386	33.568	9.828	0.617	46.570
柠条	4.650	0.459	0.311	31.418	13.104	0.266	30.080
侧柏	5.208	0.328	0.353	33.148	13.104	0.325	39.030
侧柏	3.906	0.491	0.232	33.175	6.552	0	33.350
紫穗槐、樟子松混交林	1.488	0.229	0.129	34.722	6.552	0.500	34.200
小美旱杨	3.720	0.229	0.260	34.223	6.552	0	25.250
新疆杨	3.720	0.164	0.334	33.384	6.552	0.149	24.430

5.2.2 土壤 N

土壤全氮含量代表着土壤氮素的总储量和供氮潜力, 土壤中氮素绝大部分为有机的结合形态, 无机形态的氮一般只占全氮的 1%-5%. 土壤全氮含量通常用于衡量土壤氮素的基础肥力。土壤中有机态氮可以分为半分解的有机质, 微生物躯体和腐殖质, 主要是腐殖质。有机形态的氮大部分必须经过土壤微生物的转化作用, 变成无机形态的氮, 才能为植物吸收利用。由表 5-7 可以看出土壤全 N 含量与有机质含量的相关性显著, 土壤速效 N 的含量与土壤有机质含量的相关性也显著。从表 5-5~表 5-7 可以看出, 土壤全 N 和速效 N 含量最高的为 1 号样地的小叶杨、刺槐混交林地, 全 N 含量为 0.590 g/kg, 速效 N 含量为 14.742 mg/kg。其次为 4 号样地的 13 年生小叶杨林地和 7 号样地的 15 年生小叶杨林地, 全 N 含量都为 0.557 g/kg, 速效 N 含量 4 号样地为 14.742 mg/kg, 7 号样地为 13.104 mg/kg 这表明杨树在停止生长之后, 随着年龄的增

长对 N 的需求不会再有很大的变化。含 N 量最小的是 16 号样地的新疆杨林地，全 N 含量为 0.164 g/kg，速效 N 含量为 6.552 mg/kg，速效 N 占全 N 的比例在 1.33~3.99% 之间。

表 5-6 黄羊滩土壤有机质和氮、磷、钾变化趋势关系表

Tab. 5-6 Changing trend of soil organic matter with N.P.K

名称	趋势项	相关系数	显著性 (0.05)
有机质-全 N	$y=5.961x+1.6435$	0.5484	显著
有机质-全 P	$y=11.790x+0.6750$	0.6617	显著
有机质-全 K	$y=-0.167x+9.665$	-0.1286	不显著
有机质-速 N	$y=0.281x+1.064$	0.6757	显著
有机质-速 P	$y=-0.083x+4.283$	-0.2956	不显著
有机质-速 K	$y=0.076x+1.507$	0.3851	显著

5.2.3 土壤 P

土壤全 P 是指土壤中各种形态磷素的总和。土壤全磷含量的高低，受土壤母质，成土作用耕作施肥的影响很大，与土壤质地和土壤有机质含量也有关系。从表 5-7 可以看出，土壤全 P 与土壤有机质之间呈显著相关性关系，有机质丰富的土壤全 P 含量也多，而速效 P 与土壤有机质之间则呈现不显著相关性关系。磷在土壤中稳定性较大，不易流动和损失，也难被植物吸收利用。从表 6-7 可以看出土壤中速效 P 占全 P 含量的比例在 0-0.95% 之间，只有 9 号样地的沙枣林地速效 P 占全 P 的比例高达 7.35%，这表明沙枣的生长需 P 量比较少。在这 16 块样地中全 P 含量最高的 10 号样地的樟子松林地，全 P 含量为 0.386 g/kg，最低的 14 号样地的紫穗槐、樟子松混交林地，全 P 含量为 0.129 g/kg，而速效 P 含量最高的是 9 号样地的沙枣林地，其速效 P 含量达到 21.194 mg/kg，13 号样地的 7 年生侧柏和 15 号样地的小美旱杨样地中都不含有速效 P。

5.2.4 土壤 K

K 是土壤重要的理化指标，亦是作物吸收量最多的营养元素之一。K 素能增强植物的抗病力，并能缓和由于 N 肥过多所引起的有害作用。K 能减少蒸腾，调节植物组织中的水分平衡，提高植物的抗旱性。在严寒冬季，K 肥可以促进植物体中淀粉转化为可溶性糖类，从而提高植物的抗寒性。

土壤中存在的钾，主要有三种类型，即溶解型，交换型与非交换型。前两者易被植物吸收利用，称为有效钾，后者难以溶解，不被植物利用，称为无效性钾。土壤中全钾量与氮和磷相比要高的多，但不等于说土壤已经有了足够的钾素供应植物需要了，因为土壤中的钾大部分以难溶的形态存在^[65]。从表 5-7 可以看出土壤全 K 与土壤有机质之间存在不显著相关性关系，而速效 K 与土壤有机质之间则存在显著性相关关系。土壤中速效 K 占全 K 的比例仅为 0.073~0.138%。在所调查的所有样地中全 K

含量最高的是 14 号样地的紫穗槐、樟子松林地, 含量达到 34.722 g/kg, 含量最小的 8 号样地的沙柳林地也达到了 30.894 g/kg, 这与土壤中 K 的含量大于 N、P 的结论相一致^[82]。速效 K 含量最高的是 10 号样地的樟子松林地, 含量为 46.570mg/kg, 最低的含量 24.430mg/kg 的 16 号样地的新疆杨林地。

5.2.5 不同人工林土壤肥力进行综合评价

选择不同人工林土壤全氮、全磷、全钾、速效氮、速效磷、速效钾、土壤有机质等作为综合评价土壤肥力的指标。为了尽可能客观地对不同林分类型的人工林进行比较, 我们选取各个标准地 0~60cm 深度的土壤混合土壤进行测定, 然后用上述方法求得各对应点的关联系数和关联度 (见表 5-7 和表 5-8)。关联度越大表示越接近理想状态时的指标, 也就是土壤肥力越好。各人工林土壤肥力水平结果为: 5 号样地的小叶杨、杏树混交林地>1 号样地的小叶杨、刺槐混交林地>4 号样地的 9 年生小叶杨林地>10 号样地的樟子松林地>9 号样地的沙枣林地>7 号样地的 15 年生小叶杨林地>12 号样地的 17 年生侧柏林地>6 号样地的 13 年生白榆林地>3 号样地的 7 年生白榆林地>11 号样地的柠条林地>2 号样地的 5 年生刺槐林地>13 号样地的 7 年生侧柏林地>16 号样地的新疆杨林地>15 号样地的小美旱杨林地>14 号样地的紫穗槐、樟子松林地> 8 号样地的黄柳林地。从评价的结果我们可以看出 5 号样地的杨树、杏树混交林地的土壤肥力最好, 其次是 1 号样地的小叶杨、刺槐混交林地, 最差的是 8 号样地的黄柳林地。

表 5-7 不同人工林土壤养分含量标准化结果

Table 5-7 The standardized results of soil nutrient contents in different plantations

样地号	有机质	全 N	全 P	全 K	速 N	速 P	速 K
1	0.5882	1.0000	0.5687	0.6857	0.8333	0.0291	0.7349
2	0.3824	0.6150	0.6756	0.5142	0.6667	0.0318	0.1075
3	0.2647	0.3850	0.1069	1.0000	0.6667	0.0704	0.1215
4	0.5588	0.9225	0.8893	0.4743	0.8333	0.0815	0.4905
5	1.0000	0.9601	0.9084	0.5599	1.0000	0.1366	0.9968
6	0.4118	0.7676	0.7824	0.3771	0.6667	0.0236	0.3008
7	0.5294	0.9225	1.0000	0.3827	0.3333	0.0456	0.4467
8	0.2353	0.6925	0.1947	0.0000	0.0000	0.0209	0.1563
9	0.0882	0.6150	0.6069	0.4457	0.3333	1.0000	0.8455
10	0.4118	0.3850	0.9809	0.5828	0.3333	0.0291	1.0000
11	0.5000	0.6925	0.6947	0.1142	0.6667	0.0126	0.2552
12	0.5882	0.3850	0.8550	0.4913	0.6667	0.0153	0.6594
13	0.3824	0.7676	0.3931	0.4972	0.0000	0.0000	0.4029
14	0.0000	0.1526	0.0000	0.8344	0.0000	0.0236	0.4413
15	0.3529	0.1526	0.5000	0.7256	0.0000	0.0000	0.0370
16	0.3529	0.0000	0.7824	0.5427	0.0000	0.0070	0.0000

表 5-8 不同人工林土壤养分含量关联系数

Table 5-8 The association coefficient of soil nutrient contents in different plantations

样地号	有机质	全 N	全 P	全 K	速 N	速 P	速 K	关联度
1	0.5484	1.0000	0.5369	0.6140	0.7500	0.3399	0.6535	0.6347
2	0.4474	0.5650	0.6065	0.5072	0.6000	0.3406	0.3591	0.4894
3	0.4048	0.4484	0.3589	1.0000	0.6000	0.3497	0.3627	0.5035
4	0.5312	0.8658	0.8187	0.4875	0.7500	0.3525	0.4953	0.6144
5	1.0000	0.9261	0.8452	0.5319	1.0000	0.3667	0.9936	0.8091
6	0.4595	0.6827	0.6968	0.4453	0.6000	0.3387	0.4169	0.5200
7	0.5151	0.8658	1.0000	0.4475	0.4286	0.3438	0.4747	0.5822
8	0.3954	0.6192	0.3831	0.3333	0.3333	0.3380	0.3721	0.3963
9	0.3542	0.5650	0.5598	0.4742	0.4286	1.0000	0.7639	0.5922
10	0.4595	0.4484	0.9632	0.5451	0.4286	0.3399	1.0000	0.5978
11	0.5000	0.6192	0.6209	0.3608	0.6000	0.3362	0.4017	0.4912
12	0.5484	0.4484	0.7752	0.4957	0.6000	0.3368	0.5948	0.5428
13	0.4474	0.6827	0.4517	0.4986	0.3333	0.3333	0.4557	0.4575
14	0.3333	0.3711	0.3333	0.7512	0.3333	0.3387	0.4723	0.4190
15	0.4359	0.3711	0.5000	0.6457	0.3333	0.3333	0.3418	0.4230
16	0.4359	0.3333	0.6968	0.5223	0.3333	0.3349	0.3333	0.4271

5.3 不同类型人工林生长状况

不同的林分由于树种本身的特性、立地条件及造林时间的不同使得林分的生长差别较大。生长快，长势好的林分说明其内部生态系统物质循环和能量流动运转机制较活跃，对外界的干扰具有较强的抵抗性和恢复性。

5.3.1 株高、冠幅的比较

为了方便的比较不同年龄的人工林的生长状况，用树高、胸径、单株生长量、林分生长量分别除以各自人工林的年龄，得到年平均树高、胸径、单株生长量、林分生长量。

比较不同人工林年平均树高生长量，15 号样地的小美旱杨和 16 号样地的新疆杨是株高年平均生长量最大的，黄羊滩由于处于干旱半干旱地区乔木的生长根据不同的树种停止生长的年份也不一样，其中杨树出现停止生长的年份最早，这其中包括小叶杨、小美旱杨、新疆杨的各种杨树树种，一般在 7、8 年树木基本停止生长，出现衰退也是最早的，这与唐德瑞（2000）的小叶杨的生长一般在 4~9 a 间生长速率下降剧烈的观点相一致^[83]。退化主要表现在顶梢枯死，枝条干枯，出现萌蘖。因此在停止生长的乔木林中杨树的枯死枝数量是最多的，同时杨树在生长期生长也是最快的，中间几乎没有“保持期”便开始衰退。在这 16 块标准地中，第 2 块样地的刺槐、第 3 块样地的榆树和第 13 块样地的侧柏还处于生长期，其余的都已停止生长。小美旱

杨和新疆杨的干性比较好因此在黄羊滩地区作为行道树,而侧柏和柠条的高生长比较缓慢因此株高年平均生长量也是最小的。冠幅年平均生长量最大的是2号样地的刺槐和3号样地的榆树,因为2块样地都同时处于生长阶段,因此冠幅的年平均生长量是最大的。

5.3.2 不同人工林生物量(干重)的比较

群落生物量是研究森林生态系统最重要的内容之一,它是物质循环和能量平衡等研究的基础^[84,85]。森林的生物量积累和生产力的发展是生态系统发展的根本动力,森林生物量的动态决定了生态系统的动态^[86]。由于条件有限,本研究仅对各人工林地上部分生物量进行了调查。不同类型人工林单株的生物量及林分的总生物量见表5-9。其生物量来看10号样地的樟子松的单株年平均生长量4.6620 kg/株·a是最大的,林分年平均生长量146.8385 kg/hm²·a和年均净生产量157.1962 kg·a⁻¹也都是所调查样地中最高的。究其原因樟子松样地的密度比较小每亩地仅为34株。其次为6号样地13年生的白榆林,单株年平均生物量也达到了1.6790 kg/株·a,并且在这两块样地中都没有出现明显的退化现象。为了便于比较,用年平均净生产量这一指标来衡量各林分生物量的累积速度(见表5-10)。

表 5-9 不同人工林林分生长状况

Table 5-9 The growth conditions of different forest stands

样地号	类型	株高年平均生长量 (m·a ⁻¹)	冠幅年平均生长量 (m ² ·a ⁻¹)	单株年平均生物量 (kg/株·a)	林分年平均生长量 (kg/hm ² ·a)	年均净生产量 (kg·a ⁻¹)
1	杨树、杏树					
	混交	0.2940	0.2370	0.6770	26.6100	67.4400
2	刺槐	0.4400	0.4800	0.1860	10.4300	34.2100
3	榆树	0.5430	0.4630	0.4190	40.9143	41.6357
4	杨树	0.2320	0.2910	0.8580	22.3115	24.6231
5	杨树、杏树	0.2430	0.4190	1.0460	8.6346	24.3462
	混交					
6	榆树	0.4460	0.3510	1.6790	109.1192	110.5000
7	杨树	0.3170	0.2550	1.2690	128.1958	136.7708
8	沙柳	0.3640	0.2800	0.3600	0.42680	0.4270
9	沙枣	0.4360	0.2800	0.4140	37.6357	47.7857
10	樟子松	0.3310	0.3380	4.6620	146.8385	157.1962
11	柠条	0.1260	0.1860	0.0500	2.7500	3.2600
12	侧柏	0.1350	0.1510	0.4560	24.1912	30.5588
13	侧柏	0.2290	0.1160	0.2640	24.0214	28.3429
14	紫穗槐	0.2500	0.2260	0.2000	2.5900	3.0900
15	小美旱杨	0.6700	0.1600	0.8520	66.4778	67.5278
16	新疆杨	0.8400	0.2500	1.0170	83.3833	84.4722

5.3.2 不同人工林林分生长状况综合评价

对林分生长状况的评价，我们选取了树高年平均生长量、冠幅年平均生长量、单株年平均生长量、林分年平均生长量和年均净生产量 5 个指标进行综合评价。对黄羊滩地区不同类型人工林土壤水分状况的评价。

通过对黄羊滩不同人工林林分生长状况的灰色关联度分析（见表 5-10~5-11），我们可以看出生长状况的综合评价结果为：10 号样地的樟子松林地>16 号样地的新疆杨林地>7 号样地的 15 年生小叶杨林地>6 号样地的 13 年生白榆林地>3 号样地的 7 年生白榆林地>2 号样地的刺槐林地>15 号样地的小美旱杨>5 号样地的小叶杨、杏树混交林地>9 号样地的沙枣林地>1 号样地的小叶杨、刺槐混交林地>4 号样地的 9 年生小叶杨林地>8 号样地的黄柳>14 号样地的紫穗槐、樟子松混交林地>12 号样地的 17 年生侧柏林地>13 号样地的 7 年生侧柏林地>11 号样地的柠条。

表 5-10 不同林分相对生长状况标准化结果

Table 5-10 The standardized results of relative growth conditions in different forest stands

样地号	树高年平均生长量 ($\text{m}\cdot\text{a}^{-1}$)	冠幅年平均生长量 ($\text{m}^2\cdot\text{a}^{-1}$)	单株年平均生长量 ($\text{t}/\text{株}\cdot\text{a}$)	林分年平均生长量 ($\text{t}/\text{hm}^2\cdot\text{a}$)	年均净生产量 ($\text{t}\cdot\text{a}^{-1}$)
1	0.2353	0.3324	0.1359	0.1788	0.4275
2	0.4398	1.0000	0.0295	0.0683	0.2155
3	0.5840	0.9533	0.0800	0.2765	0.2629
4	0.1485	0.4808	0.1752	0.1495	0.1543
5	0.1639	0.8324	0.2160	0.0561	0.1526
6	0.4482	0.6456	0.3532	0.7424	0.7021
7	0.2675	0.3819	0.2643	0.8727	0.8697
8	0.3333	0.4505	0.0672	0.0000	0.0000
9	0.4342	0.4505	0.0789	0.2541	0.3021
10	0.2871	0.6099	1.0000	1.0000	1.0000
11	0.0000	0.1923	0.0000	0.0159	0.0181
12	0.0126	0.0962	0.0880	0.1623	0.1922
13	0.1443	0.0000	0.0464	0.1612	0.1781
14	0.1737	0.3022	0.0325	0.0148	0.0170
15	0.7619	0.1209	0.1739	0.4511	0.4280
16	1.0000	0.3681	0.2097	0.5666	0.5361

表 5-11 不同林分相对生长状况关联系数

Table 5-11 The association coefficient of relative growth conditions in different forest stands

样地号	株高年平均生 长量	冠幅年平均生 长量	单株年平均生 物量	林分年平均生长 量	年均净生产 量	关联度
1	0.3953	0.4282	0.3666	0.3785	0.4662	0.4070
2	0.4716	1.0000	0.3400	0.3492	0.3893	0.5100
3	0.5459	0.9146	0.3521	0.4087	0.4042	0.5251
4	0.3699	0.4906	0.3774	0.3702	0.3716	0.3959
5	0.3742	0.7490	0.3894	0.3463	0.3711	0.4460
6	0.4754	0.5852	0.4360	0.6600	0.6267	0.5566
7	0.4057	0.4472	0.4046	0.7970	0.7933	0.5696
8	0.4286	0.4764	0.3490	0.3333	0.3333	0.3841
9	0.4691	0.4764	0.3518	0.4013	0.4174	0.4232
10	0.4122	0.5617	1.0000	1.0000	1.0000	0.7948
11	0.3333	0.3824	0.3333	0.3369	0.3374	0.3447
12	0.3362	0.3562	0.3541	0.3738	0.3823	0.3605
13	0.3688	0.3333	0.3440	0.3735	0.3782	0.3596
14	0.3770	0.4174	0.3407	0.3366	0.3372	0.3618
15	0.6774	0.3625	0.3770	0.4767	0.4664	0.4720
16	1.0000	0.4417	0.3875	0.5357	0.5187	0.5767

5.4 不同类型人工林草本层植物物种多样性

5.4.1 不同人工林林下草本层植物区系组成

生物多样性（biodiversity）是生物及其与环境形成的生态复合体以及与此相关的各种生态过程的总和，是生命系统的基本特征^[87-90]。生物多样性包括遗传多样性、物种多样性、生态系统多样性、景观多样性。对物种多样性的研究可体现群落和生态系统的结构类型、组织水平、发展阶段、稳定程度、生境差异等^[91]。生物多样性的研究大多集中在天然植物群落的物种多样性方面，而对于人工林群落物种多样性研究较少。大量的研究证明生物多样性的提高会增强生态系统的稳定性^[92-94]，在众多的研究中也普遍把生物多样性作为衡量生态系统稳定性的一个重要指标。

表 5-12 不同人工林林下植物种类名录

Tab.5-12 The species item undergrowth among forest stands

种名	学名	频率 (%)
飞蓬	<i>Erigeron acer</i> .L.	91
胡枝子:	<i>Lespedeza bicolor</i> Turcz	57
狗尾草	<i>Setaria viridis</i> (L)Bcaur.	54
针茅	<i>Stipa grandis</i>	52
星毛刺星藜	<i>Echinopsilor divaricatum</i>	52
地稍瓜	<i>Cynanchum thesioides</i>	48
蒺藜	<i>Tribulus terresteis</i> .	48
羊柴	<i>Integration</i>	39
沙蒿	<i>Artemisia desertorum spreng.</i>	30
艾蒿	<i>Artemisia argylevl.et.vant.</i>	27
沙打旺	<i>Astragalus adsurgens pal</i>	22
蓝刺头	<i>Echinops latifolius Tausch.</i>	22
猪毛菜	<i>Salsola collina pall.</i>	22
大戟	<i>Euphorbia pekinensis Rupr.</i>	22
藜	<i>Chenopodium album</i>	22
甘草	<i>Glycyrrhiza uralensis Fisch</i>	17
猫眼草	<i>Euphorbia lunulata Bunge</i>	17
地椒	<i>Thymus quinquecostatus celak.</i>	17
黄花铁线莲	<i>Clematis intricate Bge.</i>	17
角蒿	<i>Incarvillea Sinensis</i>	17
萝摩	<i>Metaplexis japonica</i>	13
短根胡枝子	<i>Lespedeza cyrtobotrya miq</i>	9
棘豆	<i>Oxytropis</i>	9
茵陈蒿	<i>Artemisia capillaris Thunb.</i>	9
碱蓬	<i>Suaeda glauce.</i>	9
虎尾草	<i>Chloris vivgata.</i>	9
远志	<i>Polygala tenuifolia willd.</i>	9
角碱蓬	<i>Suaeda corniculata</i>	9
防风	<i>Saposhnikovia divaricata</i>	6
稗草	<i>Echinochloa crusgallill.Beaur.</i>	4
黄芩	<i>Scutellaria baicalensis Georgi.</i>	4
节节草	<i>Equisetum ramosissimum.</i>	4
打碗花	<i>Calystegia hederacea wall.ex.Roxb.</i>	4
鹤虱	<i>Lappula myosotis V.</i>	4
披碱草	<i>Elymus dahuricus L.</i>	4

本研究所涉及的树种均为外来物种，根据以往的研究，外来物种对乡土树种的影响说法不一，所以在探讨黄洋滩地区人工林林下植物多样性问题对研究生物多样性

可以指整个群落也可以指群落中某一特定层次的生物多样性,根据试验地人工林的实际情况,本研究只涉及草本层植物多样性。见表 5-12,在所调查的 16 块样地共有植物 31 种,隶属 15 个科。在样方中出现最多的前三个科为:豆科、菊科、禾本科,这三个科的植物种类分别占林下植物种类的 16.3%、15.9%、13.0%,三者总共为 45.2%;其次为藜科、萝藦科、大戟科、唇形花科,植物种的百分数都为 6.5%;毛茛科、蒺藜科、远志科旋花科、紫薇科、伞形花科、紫草科、木贼科各出现一个种,占总种类的 3%。在样方中出现最多的前 3 个种植物种类为飞蓬、胡枝子、狗尾草、其频率分别为 91%、57%、54%。出现频率在一半以上的有 5 个种,分别为飞蓬、胡枝子、狗尾草、针茅、星毛刺星藜。所有人工林林下植物种数平均每块样地为 9 个种,比较人工林地和荒草地其草本层的物种数没有很大区别,不同类型人工林之间林下植物种类相差较大,在这 16 块样地中物种数最多的是 12 号样地 17 年生的侧柏林和 1 号样地的 15 年生的小叶杨、刺槐混交林林下植物物种数相对较多,其次为 3 号样地的 7 年生的白榆,最少的 8 号样地的黄柳地其草本层出零星分布几株狗尾草外,再没有其他物种,黄柳地的表面粗沙的颗粒比较大,但为什么黄柳地上几乎没有其他物种的存在,因该从黄柳的生理生态特性上作进一步的研究,目前有关这方面的研究很少。

5.4.2 不同类型人工林草本层植物物种多样性指数

物种多样性指数是把物种数、个体数、分布特性等信息结合起来的一个统计量,能定量反映群落或生境中物种的丰富度、变化程度或均匀度。因此,可以用多样性指数来定量表征群落和生态系统特征^[95]。表 5-13 为不同林分林下植物物种多样性指数的结果,Shannon-Wiener 指数的大小随林分物种数的增加有增大的趋势,Shannon-Wiener 指数的变化在 0-2.2205 之间,指数值在 2 以上的就只有 12 号样地的 17 年生侧柏林和 1 号样地的小叶杨、刺槐混交林,指数最大的是海拔较高和年龄较大的 12 号样地的侧柏林,指数值在 1 以下的有 4 块样地,7 号样地的小叶杨林、9 号样地的沙枣林、2 号样地的刺槐林、8 号样地的黄柳林,最小的为地表沙粒比较粗大的黄柳林地。并非物种数多该指数就一定大,这是由于 Shannon-Wiener 指数是物种丰富度和均匀度的函数,只有物种越多且分布越均匀,该指数才越大。7 号样地的小叶杨林和 9 号样地的沙枣林,从表中也可以看出,虽然物种数都为 10 和 10 种以上,但 Shannon-Wiener 指数都小于 1。Simpson 指数是反映群落优势度较好的指标,在所研究的林分中,Simpson 指数的变化在 0.0712-1 之间,Simpson 指数最小值的样地是 8 号样地的黄柳林地起指数值为 0,最大值的样地为林龄比较大的侧柏林地和小叶杨、刺槐混交林地。Simpson 指数的变化趋势与物种的数量也基本一致。

物种的均匀度指数,这里采用的是彭少麟根据物种均匀度的一般意义分别以 Shannon-Wiener 指数和 Simpson 指数为基础组建的两个均匀度公式(Jsw, Js)。群落均匀度指数在反映群落稳定性方面具有较大的价值,较稳定的群落一般具有较高的均匀度^[96]。表 5-13 列出了不同林分草本层均匀度指数,两个指数的变化范围都在 0-1 之间,最小值出现的样地与 Shannon-Wiener 指数相同,都为沙柳林地;两者的最大

值非常接近,且都出现在 11 号样地的柠条林中。由于均匀度是指取样样地中各个种多度的均匀程度,虽然样地中物种丰富度相同但各种类的多度不同导致均匀度指数相差很大,比如 9 号样地的沙枣林中,物种数为 10 种,Js_w 指数分别为 0.7819、0.2583,两者差别较大;Js 指数分别为 0.8681、0.3070,也同样存在差别,但没有 Js_w 指数明显。而 7 号样地白榆林地、16 号样地的新疆杨林地物种数均为 9 种,Js_w 指数分别为 0.5502、0.5403、0.5484,三者相差不大,Js 指数分别为 0.6025、0.6117、0.6504,三者差别也不大。Js 指数的变化趋势与 Shannon-Wiener 和 Simpson 指数基本一致。

物种丰富度指标是测定一定空间范围内的物种数目以表达生物的丰富程度,这里我们采用的是 argalef 指数和 Patrick 指数,两种指数由于采用的计算方法不一样,其结果也存在差异性,d₁ 的最大值是 12 号样地的 17 年生侧柏林地,其次是 1 号样地的小叶杨、刺槐混交林地,最小的是 8 号样地的黄柳林地也同时为 0,其次是 2 号样地的 5 年生刺槐林地。d₂ 的最大值是 11 号样地的柠条林地,其次是 1 号样地的小叶杨、刺槐混交林地,最小的也为 8 号样地的黄柳林地指数值为 0,其次为 2 号样地的 5 年生刺槐林地。

表 5-13 不同类型人工林草本层植物物种多样性指数

Table. 5-13 The comparison of species diversity undergrowth among forest stands

样方类型	物种数	Sp	Sw	Js	Js _w	d ₁	d ₂
小叶杨、刺槐混交林	17	0.8211	2.0878	0.8724	0.7369	3.3845	1.5992
刺槐	4	0.0712	0.1792	0.0949	0.1292	0.4725	0.1672
白榆	13	0.6759	1.5105	0.7322	0.5889	2.2779	0.9333
小叶杨	7	0.6048	1.2611	0.7056	0.6481	0.9721	0.3198
小叶杨、杏树混交林	8	0.5579	1.0792	0.6376	0.519	1.1616	0.3931
白榆	9	0.5356	1.209	0.6025	0.5502	1.6097	0.7500
小叶杨	11	0.3721	0.8039	0.4093	0.3353	1.7095	0.5905
黄柳	1	0	0	0	0	0	0
沙枣	10	0.2763	0.5947	0.307	0.2583	1.3720	0.3763
樟子松	8	0.564	1.0228	0.6446	0.4919	1.1693	0.4010
柠条	8	0.7727	1.7665	0.8831	0.8495	2.2646	1.7056
侧柏	24	0.8143	2.2205	0.8497	0.6987	3.7330	1.1023
侧柏	8	0.6500	1.2952	0.7429	0.6229	1.3645	0.6153
紫穗槐樟子松混交林	8	0.7274	1.5046	0.8314	0.7236	1.1737	0.4056
小美旱杨	12	0.7121	1.5205	0.7768	0.6119	1.9995	0.7666
新疆杨	9	0.5782	1.2050	0.6504	0.5484	1.2663	0.3823

注: Sw: Shannon-Wiener 指数; Sp: Simpson 指数; Js_w、Js: Pielou 指数; d₁: Margalef 指数; d₂: Patrick 指数。

5.4.3 不同类型人工林草本层植物物种多样性综合评价

用灰色关联分析法评价不同类型人工林林下植物物种多样性,选择的指标为物种丰富度、Shannon-Wiener 指数、Simpson 指数、Jsw 指数和 Js 指数等。因为 Simpson 指数是反映群落的优势度,所以用 1 减去不同人工林生物多样性指数的标准化值。标准化结果及关联度分析见表 5-14 和表 5-15。

得出不同林分林下植物多样性的顺序为:12 号样地的 17 年生侧柏>1 号样地的小叶杨、刺槐混交林地>11 号样地的柠条林地>15 号样地的小美旱杨>14 号样地的紫穗槐、樟子松林地>3 号样地的白榆林地>13 号样地的 7 年生侧柏林地>4 号样地的 13 生小叶杨林地>6 号样地的 13 年生白榆林地>16 号样地的新疆杨林地>5 号样地的小叶杨、杏树混交林地>10 号样地的樟子松林地>7 号样地的 12 年生小叶杨林地>9 号样地的沙枣林地>2 号样地的 5 年生刺槐林地>8 号样地的黄柳林地。

表 5-14 不同人工林物种多样性标准化结果

Table.5-14 The standardized results of species diversity undergrowth among forest stands

样方号	物种数	Sp	Sw	Js	Jsw	d1	d2
1	0.6957	1.0000	0.9402	0.9879	0.8675	0.9066	0.9376
2	0.1304	0.0867	0.0807	0.1075	0.1521	0.1266	0.0981
3	0.5217	0.8232	0.6803	0.8291	0.6932	0.6102	0.5472
4	0.2609	0.7366	0.5679	0.7990	0.7629	0.2604	0.1875
5	0.3043	0.6795	0.4860	0.7220	0.6109	0.3112	0.2305
6	0.3478	0.6523	0.5445	0.6823	0.6477	0.4312	0.4397
7	0.4348	0.4532	0.3620	0.4635	0.3947	0.4580	0.3462
8	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
9	0.3913	0.3365	0.2678	0.3476	0.3041	0.3675	0.2207
10	0.3043	0.6869	0.4606	0.7299	0.5790	0.3132	0.2351
11	0.3043	0.9411	0.7955	1.0000	1.0000	0.6066	1.0000
12	1.0000	0.9917	1.0000	0.9622	0.8225	1.0000	0.6463
13	0.3043	0.7916	0.5833	0.8412	0.7333	0.3655	0.3608
14	0.3043	0.8859	0.6776	0.9415	0.8518	0.3144	0.2378
15	0.4783	0.8673	0.6848	0.8796	0.7203	0.5356	0.4495
16	0.3478	0.7042	0.5427	0.7365	0.6456	0.3392	0.2242

表 5-15 不同人工林物种多样性关联系数

Table.5-15 The association coefficient of species diversity undergrowthamong different forest stands

样方号	物种数	Sp	Sw	Js	Jsw	d1	d2	关联度
1	0.6217	1.0000	0.8932	0.9764	0.7905	0.8426	0.8890	0.8591
2	0.3651	0.3538	0.3523	0.3591	0.3709	0.3641	0.3567	0.3603
3	0.5111	0.7388	0.6100	0.7453	0.6197	0.5619	0.5248	0.6159
4	0.4035	0.6550	0.5364	0.7133	0.6783	0.4034	0.3810	0.5387
5	0.4182	0.6094	0.4931	0.6427	0.5624	0.4206	0.3939	0.5057
6	0.4340	0.5898	0.5233	0.6115	0.5866	0.4678	0.4716	0.5264
7	0.4694	0.4776	0.4394	0.4824	0.4524	0.4798	0.4334	0.4621
8	0.3333	0.3333	0.3333	0.3333	0.3333	0.3333	0.3333	0.3333
9	0.4510	0.4297	0.4058	0.4339	0.4181	0.4415	0.3908	0.4244
10	0.4182	0.6149	0.4810	0.6493	0.5429	0.4213	0.3953	0.5033
11	0.4182	0.8946	0.7097	1.0000	1.0000	0.5597	1.0000	0.7975
12	1.0000	0.9837	1.0000	0.9297	0.7380	1.0000	0.5857	0.8910
13	0.4182	0.7058	0.5454	0.7590	0.6521	0.4407	0.4389	0.5657
14	0.4182	0.8142	0.6080	0.8953	0.7714	0.4217	0.3961	0.6178
15	0.4894	0.7903	0.6133	0.8059	0.6413	0.5185	0.4760	0.6192
16	0.4340	0.6283	0.5223	0.6549	0.5852	0.4307	0.3919	0.5210

5.5 不同林龄稳定性之间的比较

林龄反映着林分自然整枝和透光状况，在同一地区相同树种因为其林龄的不同各个指标在之间的差异性也比较明显，从表 5-16 我们可以看出，停止生长的林龄较大的杨树、榆树、侧柏的土壤的水分状况都明显的高与林龄比较小还在生长期的。土壤的肥力状况杨树和榆树、侧柏的有所不同，15 年生的小叶杨比 9 年生的小叶杨肥力的关联系数小，而大林龄的白榆和侧柏比小林龄的肥力的关联系数大。在树木的生长状况方面大林龄的比小林龄的关联系数都大，侧柏树种因为生长比较缓慢，大林龄和小林龄之间的差距比较小，而阔叶树种杨树和榆树大林龄和小林龄之间的差距比较大。在物种多样性方面阔叶树种的杨树和榆树都表现为大林龄的关联度系数小于小林龄的，而侧柏大林龄的关联度系数 0.8910 明显的大于小林龄的关联度系数 0.5657。综合评价的结果：林龄较大的停止生长的综合关联度都大于林龄较小的还处于生长阶段的，表现更为稳定。侧柏的表现更最为明显 17 年生的侧柏在所调查的 16 块样地中排名第 4 位，而 7 年生的侧柏排名仅为 14 位。有以上结论我们可以看出，黄羊滩地区经过近 7、8 年的大面积的植树造林，生态系统的稳定性得到很大的提高，尤其是随着林龄的增大，稳定性也会越来越稳定。

表 5-16 相同树种不同林龄指标表

Tab.5-16 The index of the same composition defferents stand age

树种	小叶杨		白榆		侧柏	
样地号	7	4	6	3	12	13
树龄	15	9	13	7	17	7
水分状况	0.7047	0.5256	0.5645	0.4786	0.5773	0.4832
肥力状况	0.5822	0.6144	0.5200	0.5035	0.5428	0.4575
生长状况	0.5696	0.3960	0.5566	0.5251	0.3605	0.3596
物种多样性	0.4621	0.5387	0.5264	0.6159	0.8910	0.5657
综合关联度	0.5796	0.5187	0.5419	0.5308	0.5929	0.4665
排名	5	9	7	8	4	14

5.6 不同类型人工林生态系统稳定性综合评价

我国人工林面积正在逐年增加,截止 2007 年 9 月,我国人工林保存面积超过 5364.99 万 hm^2 ,占世界人工林面积的近 1/3,居世界第一位^[55]。人工林越来越多,同时人工林所暴露出来的生态问题也越来越多,因此对人工林稳定性的评价问题显得越来越重要。对于稳定性的研究大多是集中在多样性与稳定性的关系上^[97-99],而且对天然生态系统稳定性研究较多^[100,101],有关人工生态系统稳定性的评价问题近年来陆续有些报道^[1,39,42,102]。从目前的文献来看,不同的学者对稳定性的概念理解不一,所针对的生态系统服务功能不同,导致在评价生态系统稳定性时只是从其中的某一侧面来考虑,或者只是定性地描述生态系统的稳定性因而缺乏说服力;或者虽是定量,但操作性不强。本研究通过借鉴前人对人工林生态系统稳定性理解的基础上,结合本人对稳定性的理解和黄羊滩地区的植被的特征,从影响生态系统正常运转的结构和功能两大方面建立一套黄羊滩地区人工林稳定性指标体系和评价方法,通过定量分析来评价人工林生态系统稳定性。基于以上的考虑,拟初步从不同人工林对土壤物理性状改善、土壤肥力的改良、林分的生长状况、林下植物多样性状况等几个方面来考虑。

通过对不同人工林运用灰色关联度分析法进行综合评价。结果见表 5-17,不同人工林生态系统稳定性大小排列为:小叶杨、杏树混交林地(5 号样地, 0.6214)>樟子松纯林(10 号样地, 0.6143)>小叶杨、刺槐树混交林(1 号样地, 0.5998)>17 年生侧柏纯林(12 号样地, 0.5929)>15 年生小叶杨纯林(7 号样地, 0.5796)>柠条纯林(11 号样地, 0.5691)>13 年生白榆纯林(6 号样地, 0.5419)>7 年生白榆纯林(3 号样地, 5308)>9 年生小叶杨纯林(4 号样地, 0.5187)>小美旱杨纯林(15 号样地, 0.4952)>新疆杨纯林(16 号样地, 0.4871)>5 年生刺槐纯林(2 号样地, 0.5101)>沙枣纯林(9 号样地, 0.4841)>7 年生侧柏纯林(13 号样地, 0.4665)>紫穗槐、樟子松混交林(14 号样地, 0.4623)>黄柳纯林(8 号样地, 0.3914)。

表 5-17 不同类型人工林稳定性关联系数

Table 5-17 The association coefficient of stability among forest stands

样地号	土壤物理性 质	土壤化学性 质	生长状况	多样性	关联度	排名
1	0.4986	0.6347	0.4070	0.8591	0.5998	3
2	0.5856	0.4894	0.5100	0.3603	0.4863	12
3	0.4786	0.5035	0.5251	0.6159	0.5308	8
4	0.5256	0.6144	0.3959	0.5387	0.5187	9
5	0.7247	0.8091	0.4460	0.5057	0.6214	1
6	0.5645	0.5200	0.5566	0.5264	0.5419	7
7	0.7047	0.5822	0.5696	0.4621	0.5796	5
8	0.4518	0.3963	0.3841	0.3333	0.3914	16
9	0.4964	0.5922	0.4232	0.4244	0.4841	13
10	0.5614	0.5978	0.7948	0.5033	0.6143	2
11	0.6432	0.4912	0.3447	0.7975	0.5691	6
12	0.5773	0.5428	0.3605	0.8910	0.5929	4
13	0.4832	0.4575	0.3596	0.5657	0.4665	14
14	0.4507	0.4190	0.3618	0.6178	0.4623	15
15	0.5260	0.4230	0.4720	0.6192	0.5101	10
16	0.5010	0.4271	0.5767	0.5210	0.5065	11

从表 5-17 可以看出，在对土壤的物理性质和化学性质方面，5 号样地的小叶杨、杏树混交林地是最好的，而 10 号样地的樟子松林地则处于中等水平。在林分的生长状况方面，10 号样地的樟子松林则遥遥领先，其关联系数达 0.7948，5 号样地的小叶杨、杏树混交林生长状况也表现较好，其他人工林相对来说差别不大。在林下植物多样性方面，5 号样地和 10 号样地居中。各指标综合评价的结果显示 5 号样地的小叶杨、杏树混交林地是最好的，其次是 10 号样地樟子松林地，两种类型为所研究的人工林中最稳定的模式，黄柳纯林稳定性最差，各项指标都靠后，这一结果与实际相符，比较客观地反映了实际情况。从灰色关联度计算的过程可以看出，在评价不同人工林的每一个指标时都是以样地中出现的最大值（通过数学变换转化为 1）作为该指标的最理想值，不同类型人工林的某一项指标的关联系数就是该指标数学变换值相对于该指标理想值的大小，所以不同类型人工林稳定性综合评价的关联度就是各指标关联系数的总体平均值，最稳定的杨树、杏树混交林关联度并不大，这说明所选取的人工林稳定性指标的最理想值并不是集中在某一种人工林类型中，这主要与树种的特性、立地条件、人为干扰等一系列综合因素决定的。

进一步把这 16 块样地的人工林划分为 3 种类型（见表 5-18）：大部分的人工林都处于中等稳定，只有 5 号样地的小叶杨、杏树混交林和 10 号样地的樟子松林林地处于最稳定状态，不稳定的也只有 8 号样地的黄柳林地。

表 5-18 人工林稳定性类型的划分

Table.5-18 The classification of stability among plantations

关联度	0.6 以上	0.6000~0.4000	0.4000 以下
人 工 林 类 型	5 号样地的小叶杨、 杏树混交林地 10 号样地的樟子松 林地	1 号样地的小叶杨、刺槐混交林地	
		12 号样地 17 年生的侧柏林地	
		7 号样地 15 年生小叶杨林地	
		11 号样地的柠条林地	
		6 号样地的 13 年生白榆林地	
		3 号样地的 7 年生白榆林地	
		4 号样地 9 年生小叶杨林地	8 号样地的黄柳林地
		15 号样地的小美早杨	
		16 号样地的新疆杨林地	
		2 号样地的 5 年生刺槐林地	
		9 号样地的沙枣林地	
		13 号样地的 7 年生侧柏林地	
		14 号样地的紫穗槐、樟子松混交林地	
稳定程度	最稳定	中等稳定	不稳定

对人工林生态系统管理必须深刻理解系统的稳定性机制,评价系统的抵抗力和恢复力,持续性与变异性等稳定性特征,着重评价这些驱动或控制系统的因子,从而预测外部干扰可能引起的系统行为的变化规律,制定出正确的动态管理策略。根据黄羊滩人工林的现状以及稳定性评价结果,依据黄羊滩人工林稳定性的 3 种类型,按照不同的类型对人工林进行合理地管理,从而提高人工林生态系统的稳定性。

5.7 黄羊滩人工林生态系统管理对策

5.7.1 稳定型人工林生态系统得管理

(1) 加强立地管理

立地管理的目的是防止人工林地力衰退,保证人工林生态系统物质循环和能量流动的畅通性。稳定的人工林生态系统, 林分的生长状况良好, 生长季消耗大量的土壤养分,使得土壤肥力下降,因此在植被开始生长之前,增加施肥。通过整地和林地适当施肥,改善土壤的理化性状,可以增加土壤的通透性增强某些微生物的活性从而加快林地枯枝落叶的分解,进而改善土壤肥力,促进林木生长。另外,枯枝落叶确保

留在林内,避免被当地群众收集,以保证人工林生态系统养分平衡。

(2) 加强水分管理

但是由于黄羊滩地区气候条件恶劣,干旱与高温同期,降雨量少而蒸发量大,植物水分亏缺严重。水分是影响植被生长发育的主要限制因子,造林后的经营管理必须围绕水分问题开展工作。许多草本植物只有在雨季来临才开始萌生,速生树种柠条和黄柳,由于干旱而使得其生长速度大大减缓甚至难以生存因此可以在雨季来临前通过合理的人工调控措施,比如修建集水小区,整地和坡面的防渗处理相结合,人工诱导径流等等,使有限的雨水在时间和空间上重新分配。

5.7.2 中等稳定型人工林生态系统的管理

(1) 优化群落结构

通过营造先锋树种,昔日的光板地如今已披上了绿装微环境条件有所改善,这为一些草本植物提供了良好的生存环境。但人工林垂直结构上层次单一,物种多样性较低,因此可以通过在林间补植乡土树种如:甘草、沙打旺等措施来发展多层次的群落结构,改善林内环境,促进枯枝物的分解,增加微生物的种类和数量,提高土壤酶的活性和有效养分的供给,从而有利于地力维护^[96]。另外通过构建多层次植物群落,有利于充分利用生态位,增加结构和功能的冗余。从人工林的水平结构考虑造林密度问题。从本研究来看,黄羊滩地区现在还处于沙地植被恢复的初期,对植被的承载力比较低,其造林密度都比较小,因此在现有林地的基础上因适当的混交一些能够共生的植被类型。5年生的刺槐还处于幼龄阶段,密度稍微过大,但从林分的生长状况来看,目前并没有发现枯死或枯梢现象,所以从造林密度上看还是比较合适。

(2) 人工促进天然更新

根据黄羊滩当地的情况来看,侧柏、紫穗槐、白榆等树种已经有了相当的结实量,但当侧柏种子成熟时,当地的居民就会采集大量的种子,以补充自己的经济收入,导致大量的种子流失。再次,因为当地的落种成活率比较低,几乎没有天然更新,为了提高功能的稳定性,因加强人工促进天然更新。

5.7.3 不稳定型人工林生态系统的管理

(1) 引进防风固沙效益较好的树种

在植被不易成活的裸露沙地上覆盖草垫,建立防风沙障,引种一些防风固沙效益比较好的树种,2005年河北省林科院在黄羊滩从加拿大引种了南蛇藤,取得了很好的效果。

(2) 优化群落结构

不稳定人工林的林分密度都很小,樟子松每公顷仅为517株,在此类林地上补植比较稳定的黄柳、柠条等灌木树种,增强此类林地的植被覆被率,

除此上述的管理对策之外,人文因子对加强人工林稳定性也发挥着重要作用。

人工林生态系统管理中的人文因子生态系统管理具有社会性,越来越强调人文因素在生态系统管理中的作用。然而人在生态系统管理中具有双重作用,正确地顺着植物群落自然演替的方向所采取的管理措施就会加快人工林植物群落向稳定方向发展的进程,反之则使群落发生逆向演替。人口及载畜量的增加对人工林生态系统无疑是一个很大威胁。所以要通过制定一系列的法规和政策,增强公众的环境意识,进行封山育林,使人工林生态系统自然演替,逐步向稳定的方向发展。

6 结论与讨论

6.1 结论

研究工作以黄羊滩沙地人工生态系统为研究对象,利用所设置的 16 块标准地调查资料,揭示了该地区主要植被类型生长结构、生物多样性,以及土壤水肥变化规律,以及黄羊滩沙地人工生态系统基本特征,并对黄羊滩现有人工林稳定性进行了分类评价。并且研究得出的主要结论:

(1) 黄羊滩沙地土地沙化严重,不同的人工林类型,土壤机械组成差别很大。土壤颗粒组成中,1~0.1mm 的颗粒组成百分含量在 34.63~96.01%之间,是土壤机械组成中所占的比例最高。土壤颗粒组成大于 0.05mm 的占总的颗粒组成的 87.98%。土壤容重介于 1.43~1.68 g/cm³之间,田间持水量在 14.94~24.88%范围内,土壤的含水量仅为 3.74~6.68%,反映出土壤持水和保水性能低。土壤养分总体匮乏,不同森林植被类型有机质含量差异大。小叶杨、杏树混交林地 7.812 g/kg,而紫穗槐、樟子松混交灌木林地有机质含量仅为 1.488 g/kg。通过综合分析小叶杨、杏树混交林的土壤水分和肥力,是所调查林分类型中表现最好的。

(2) 黄羊滩地区由于常年风沙比较大,地下枯落物比较少,造成该地区的土壤有机质含量较低,其中有机质含量最高的样地为 5 号样地的小叶杨、杏树混交林地 7.812 g/kg,最小的为 14 号样地的紫穗槐、樟子松的混交灌木林地有机质含量为 1.488 g/kg。通过综合评价 5 号样地的小叶杨、杏树混交林地的土壤养分关联系数最高,土壤养分状况最好。

(3) 通过对黄羊滩不同人工林生长状况的比较,小美旱杨和新疆杨的树高年平均生长量是最大的,而还处于生长阶段的小龄级的侧柏、刺槐、白榆的冠幅年平均生长量则是最大的。10 号样地的樟子松的单株年平均生长量、林分年平均生长量和年平均净生产力都是最高的。通过综合评价樟子松林的生长状况表现最好,但该林分密度比较小。

(4) 黄羊滩人工林林下植被层次单一,主要为豆科、菊科、禾本科草本植物,并且飞蓬、胡枝子、狗尾草等三种植物数量最多。生物多样性丰富程度顺序为: 17 年生侧柏>小叶杨与刺槐混交林地>柠条林地>小美旱杨>紫穗槐与樟子松混交林>白榆林地>7 年生侧柏林地>13 年生小叶杨林地>13 年生白榆林地>新疆杨林地>小叶杨与杏树混交林地>樟子松林地>12 年生小叶杨林地>沙枣林地>5 年生刺槐林地>黄柳林地。

(5) 根据以上各方面的分析结果,考虑人工林生态系统结构稳定性和功能稳定性,用灰色关联度分析方法从不同人工林土壤物理性质、土壤化学性质、林分的生长状况、及林下物种多样性这四个方面进行综合评价,最稳定的人工林为小叶杨、杏树混交林地(5 号样地,0.6214)和樟子松纯林(10 号样地,0.6143);中等稳定的为小叶杨、刺槐树混交林(1 号样地,0.5998)、17 年生侧柏纯林(12 号样地,0.5929)、

15年生小叶杨纯林(7号样地, 0.5796)、柠条纯林(11号样地, 0.5691)、13年生白榆纯林(6号样地, 0.5419)、7年生白榆纯林(3号样地, 0.5308)、9年生小叶杨纯林(4号样地, 0.5187)、小美旱杨纯林(15号样地, 0.4952)、新疆杨纯林(16号样地, 0.4871)、5年生刺槐纯林(2号样地, 0.5101)、沙枣纯林(9号样地, 0.4841)、7年生侧柏纯林(13号样地, 0.4665)、紫穗槐、樟子松混交林(14号样地, 0.4623); 最不稳定的为黄柳纯林(8号样地, 0.3914)。

(6) 根据以上不同人工林稳定性评价的结果, 主要通过水分管理使有效的水分在时空上重新分配; 通过立地管理防止人工林地力衰退, 保证人工林生态系统物质循环和能量流动的畅通性, 保证人工林生态系统养分平衡; 通过与乡土树种的搭配优化群落结构, 增加林分层次结构和物种多样性以增强人工林生态系统的功能; 通过人工促进天然更新使侧柏充分发挥其天然更新能力, 改善紫穗槐更新条件, 使黄羊滩广大的裸地尽快地得以覆盖。另外, 注重人在生态系统管理中的作用。

6.2 讨论

(1) 稳定性的研究方法还比较欠缺, 到目前为止, 还没有比较系统的研究人工林稳定性的研究方法, 本研究采取的灰色关联分析法只能从宏观上对人工林稳定性进行评价, 在以后的研究中因该进一步对人工林稳定性的研究方法有更深层次的研究。

(2) 黄羊滩地区的人工林类型比较复杂, 如果采用统一的调查方法势必影响研究的准确度和精确度, 因此在以后的调查中因该尽量选取比较准确而又适合各种不同类型林分的调查方法。

(3) 在研究不同林龄人工林稳定性时, 本研究采用空间代替时间的方法, 这种方法会产生难以控制的非确定性误差, 可能会导致稳定性动态分析的错误, 因此在以后的研究稳定性动态变化时, 因尽量选取相同空间不同时间的稳定性变化趋势。

另外, 要进一步探究杨树、榆树、侧柏的天然更新的机制, 这对黄羊滩地区的植被恢复与重建意义重大。

参考文献

- [1] 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,1996.10,7(4):337~343.
- [2] 李令军,高庆生.2000 北京沙尘暴源地分析[J].环境科学研究,2001,14(2):1~3.
- [3] 肖嗣荣,刘学锋,刘芳圆.河北省沙尘暴时空分布特征及其防治对策研究[J].地理学与国土研究,2000,16(3):21~26.
- [4] 孙保平.21 世纪中国荒漠化预防及治理技术研究展望[J].中国农业科技导报,2000,53~57.
- [5] 王国宏.再论生物多样性与生态系统的稳定性[J].生物多样性,2002,10(1):126~134.
- [6] MacArthur R. Fluctuation of animal populations, and a measure of community stability.Ecology, 1955,36: 533~536.
- [7] 郑元润.森林群落稳定性研究方法初探[J].林业科学,2000, 36(5):28~32.
- [8] Pimm S L.The complexily and stablily of ecosystem.Nature,2000, 403: 843~845.
- [9] 孙儒泳.动物生态学原理(第 2 版)[M].北京:北京师范大学出版社,1992.
- [10] 周集中,马世骏.生态系统稳定性[M].现代生态学透视.北京:科学出版社,1990.
- [11] 黄建辉.生态系统内的物种多样性对稳定性的影响[J].中国科学院生物多样性委员会(主编)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.
- [12] 黄建辉,等.生物多样性和生态系统稳定性[J].生物多样性.1995, 3 (1):31~37.
- [13] Begon,M.et al .Ecology: Individuals,populations and communities.2nd ed.Boston:Blackwell Scientific publications, 1990,816~844.
- [14] J. P 金明仕.森林生态学(文剑平)[M].北京:中国林业出版社.1991.407~409.
- [15] 何芳良.1988.生态系统的复杂性与稳定性[J].生态学进展,5(3):157~162.
- [16] Garder M R.Ashky W R. Connectance of large dynamic(cybernetic) system:critical for stability[J]. Nature,1970,288: 784~788.
- [17] May R M. Will a large complex system be stable[J]. Nature, 1972,238:413~414.
- [18] May R M. Stability and complexcity in model ecosystems[C].Princeton, University Press,1974.
- [19] McNaughton S J. Diversity and stability of ecological community: a comment on the role of empiricism in ecology[J].The American Naturalist,1977,111: 515~525.
- [20] Doak D F. Bigger E K, Harding M A ,et al. The statistical inevitability of stability-diversity relationship in community ecology[J]. The American Naturalist, 1998,151: 264~276.
- [21] Frank D A, McNaughton. Stability increases with diversity in plant community:empirical evidence from the 1988 Yellowstone drought[J]. Oikos, 1991,62: 360~363.
- [22] Connell J H. Diversity in tropical rain forests and coral reefs[J]. Sience,1978,199:1302~1310.
- [23] TillmanD .Biodiversity: population versus ecosystem stability[J].Ecology,1996,77:50~362.

- [24] Tilman D, Downing J A. Biodiversity and stability in grasslands[J]. *Nature*(London), 1994, 367: 350~362.
- [25] Hariston N G, Allan J D, Colwell R K, et al. The relationship between species diversity and stability: an experimental approach with protozoa and bacteria[J]. *Ecology*, 1968, 49: 1091~1101.
- [26] Lawler S P, Worin P J. Food web architecture and population dynamics in laboratory microcosms of protists [J]. *The American Naturalist*, 1993, 241: 675~686.
- [27] Hurd L E, Mellinger M V, Wofl L L, et al. Stability and diversity at three trophic levels in terrestrial ecosystem[J]. *Science*, 1971, 173: 1314~1316.
- [28] Lackingbull L S. Regulation, stability, and diversity in a model experimental microcosm[J]. *Ecology*, 1979, 60: 1098~1102.
- [29] McCann K, Hastings A, Huxel G R. Weak trophic interactions and the balance of nature[J]. *Nature*, 1998, 794~798.
- [30] Gary A P. Stability is woven by complex webs[J]. *Nature*, 1998, 395: 744~745.
- [31] 尚可政, 董光荣, 王式功, 等. 我国北方沙区气候变化对全球变暖的响应[J]. *中国沙漠*. 2001, 21(4): 387~392.
- [32] 丛建国. 鲁中山地侧柏林区蜘蛛群落的研究[J]. *蜘蛛学报*. 1997, 6(1): 26~30.
- [33] 刘德广, 等. 荔枝一牧草复合系统节肢动物群落多样性与稳定性分析[J]. *生态学报*, 2001, 21(10): 1569~1601.
- [34] 白永飞, 等. 锡林河流域羊草草原植物种群和功能群的长期变异及其对群落稳定性的影响[J]. *植物生态学报*, 2000, 816~844.
- [35] 石永红. 半荒漠地区绿洲混播牧草群落稳定性与调控研究[J]. *草业学报*, 2000, 9(3): 1~7.
- [36] 郑元润. 大青沟植物群落稳定性研究[J]. *生态学报*, 1999, 19(4): 65~72.
- [37] Odum E. P. The properties of agro ecosystem [A]. *Agricultural ecosystems* [C]. Wiley interscience. 1984. 5~12.
- [38] 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
- [39] 宋兆民. 我国防护林体系的发展与研究. *防护林科技*, 1998, 37(4): 14~17.
- [40] 曹文志, 等. 区域农业生态系统稳定性分析与评价的理论和方法[J]. *河南大学学报(自然科学版)*, 1998, 28(1): 70~75.
- [41] 吴延熊. 区域森林资源系统稳定性的预警分析[J]. *浙江林学院学报*, 1999, 16(1): 66~69
- [42] 李晓秀. 北京山区生态系统稳定性评价模型初步研究[J]. *农村生态环境*, 2000, 16(1): 21~25,
- [43] 李育中. 植物群落稳定性的一种测定方法. *中国草地*. 1991, 2, 78~封三.
- [44] 姜凤歧, 曾德慧, 等. 科尔沁沙地生态系统退化与恢复[M]. 北京: 中国林业出版社, 2002.
- [45] 彭少麟. 森林群落稳定性与动态测度[J]. *广西植物*, 1987, 7(1): 67~72.
- [46] 岳天祥, 马世骏. 生态系统稳定性研究[J]. *生态学报*, 1999, 19(4): 578~580.
- [47] 李树人, 等. 河南省森林生态系统类型划分及稳定性分析[J]. *河南农业大学学报*, 1994, 28(2): 111~118.

- [48] 赵 勇,等.生态因子对森林生态系统稳定性影响的数学分析[J].生物数学学报,1996,11(4):191~195.
- [49] 郑元润,等.沙地云杉种群稳定性的研究[J].生态学杂志,1996,15 (6) :13~16.
- [50] 李旭光,等.大头茶种群动态模型及稳定性分析[J].植物生态学报,1997,21(1):27~32.
- [51] 吴明作,等.栓皮栋种群数量动态的谱分析与稳定性[J].生态学杂志,2000,19 (4):23~26.
- [52] 党承林,等.植物群落的演替与稳定性[J].生态学杂志,2002,21 (2) :30~35.
- [53] 党承林,等.植物群落的冗余结构一对生态系统稳定性的一种解释[J].生态学报,1998,18 (6):665~672.
- [50] 邵青还.第二次林业革命—接近自然的林业在中欧兴起[J].世界林业研究,1991, (4) :8~15
- [55] 2 0 0 7 年中国国土绿化状况公报.
- [56] 张鼎华,著.人工林地力的衰退与维护[M] 北京:中国林业出版社, 2001.
- [57] 马兴洲.辽西地区刺槐人工林稳定性的研究[J].沈阳农业大学学报,1986,17(1):27~35.
- [58] Sankaran M and S J AcNaughton. Determinants; of biodiversity regulate compositional stability of communities[J].Nature,1999,401:691~693.
- [59] 冯耀宗.人工生态系统稳定性概念及其指标[J].生态学杂志,2002, 21(5):58~60.
- [60] 聂华林.论生态发展[J].开发研究,2002,(1):17~21.
- [61] 严以绥等.耗散结构理论与绿洲人工生态系统的可持续发展[J].新疆农垦经济,1999, (5):44~46.
- [62] YuGui rui. Conceptual Framework of ecosystem managment and the ecologicalfoundation.Journal of Applied Ecology, 2001,12(5):787~794.
- [63] 马姜明,李 昆.森林生态系统稳定性研究的现状与趋势[J].世界林业研究.2004,17(1):15~19.
- [64] 杨志国.宣化区黄羊滩沙地沙漠化治理及其效果评价[D].北京林业大学.
- [65] 鲍士旦.土壤农化分析[M].北京:中国农业出版社,2000,12:30-103.
- [66] Mangurran A E, Ecological diversity and its measurement. Princeton university press, Princeton NJ, 1988:1~179.
- [67] 马克平.生物群落多样性的测度方法 Ia 多样性的测度方法(上) [J].生物多样性,1994,2(3):162~168.
- [68] 马克平.生物群落多样性的测度方法 Ia 多样性的测度方法(下) [J].生物多样性,1994,2(4):231~239.
- [69] 谢晋阳.物种多样性指数与物种多度分布.植物科学综论(林金安主编) [M].哈尔滨,东北林业大学出版社,1993.
- [70] 邓聚龙.灰色系统基本方法[M].武汉:华中理工大学出版社,1987.
- [71] 韩 晓,何 明,李金林,杨 勇.基于灰色关联度的科研项目风险评价方法[J].北京理工大学学报,2002,22(6):778~78.
- [72] 李月芬.吉林西部草原生态环境评价及其专家系统研究[D].吉林:吉林大学博士学位论文,2004.
- [73] 陈楚莹,廖利平,汪思龙.杉木人工林生态学[M].北京:科学出版社,2000.
- [74] 李文华.西藏森林[M].北京:科学出版社, 1985.
- [75] Walker L R, Smith SM. 1997. Impacts of invasive plants on community and ecosystem properties. In Luken JO and Thieret JM eds: Assessment and management of plant invasions. Berlin: Springer.
- [76] 余作岳,彭少麟.热带亚热带退化生态系统的植被恢复及其效应[J].生态学报,15(Supp. A):1~17.
- [77] 马履一,翟明普,王林.京西山地土壤理化性质的分布[J].北京林业大学学报,1991,21(1):32~37.

- [78] 余作岳,彭少麟.热带亚热带退化生态系统植被恢复生态学研究[M].广州:广东科技出版社,1996.
- [79] 周厚诚,任海,等.南澳岛植被恢复过程中不同阶段土壤的变化[J].热带地理,2001,21(2):104~112.
- [80] 王洪君,宫芳,郑宝仁,等.落叶松人工林的土壤理化性质[J].东北林业大学学报,1997,25(3):75~79.
- [81] Chiaruccih A,Diminichis CD. Effects of pine plantations on ultramafic vegetation of central Italy.Israel Jplant Scien.1995,43(1):7~20.
- [82] 王勇辉.艾比湖流域土壤理化性质现状分析及成因研究[D].新疆师范大学.
- [83] 唐德瑞,张燕.陕西黄土高原沟壑区小叶杨生长规律初步研究[J].西北林学院学报,2000,15(1):15~19.
- [84] 李意德,曾庆波,吴仲民,等.尖峰岭热带山地雨林生物量的初步研究[M].1996.
- [85] 蒋有绪.中国森林生态系统结构与功能规律研究[M].北京:中国林业出版社,337~342.
- [86] 彭少麟,方炜.南亚热带森林演替过程生物量和生产力动态特征[J].生态科学,1995,4(2):1~9.
- [87] Marray Patterson,Anthony Cole.1999.Assessing the value of New Zealands biodiversity. Massey University,PalmerstonNorth,NZ,8~14.
- [88] 马克平.试论生物多样性的概念[J].生物多样性,1993,1(1):20~22.
- [89] 马克平,钱迎倩,王晨.生物多样性研究的现状与发展趋势[M].北京:中国科学技术出版社,1994,1~12.
- [90] 陈秋波.桉树人工林生物多样性标准与指标体系研究[J].热带作物学报,2002,23(1):95~111.
- [91] 阎海平,谭笑,孙向阳,等.北京西山人工林群落物种多样性的研究[J].北京林业大学学报.2001,23(2):16~19.
- [92] Neill,R,V.etal. A Hierarchical Concept of Ecologysystem.Princeton University Press,Princeton,NewJersey,1986.
- [93] Tilman D..Causes,consequences and ethics of biodiversity.Nature. 2000,(405):208~211.
- [94] Tilman D and J A Downing. Biodiversity and stability in grasslands.Nature. 1994,(367):363~365.
- [95] 余树全,姜春前,李翠环,等.人为经营干扰对人工雷竹林下植被多样性的影响[J].林业科学研究,2003,16(2):196~202.
- [96] S.J.McNaughton.Stability and diversity of ecological commumities.Nature. 1978,274(20):251~253.
- [97] J.P.Grime. Biodiversity and Ecosystem Function:The Debate Deepens.Science. 1997,277(29):1260~1261.
- [98] S.J.McNaughton..Diversity and stability.Nature. 1988,333(19):204~205.
- [99] Davld Tilman,John A.Downing,Dalv A.Wedin. Does diversity beget stability?.Nature. 1994,371(8):113~114.
- [100] Davld Tilman&John A.Downing. Biodiversity and stability in grasslands.Nature. 1994,367(27):363~365.
- [101] L.E.Hurd,M.V.Mellinger,L.L.Wolf,S.J.McNaughton..Stability and Diversity at Three Trophic Levels in Terrestrial Successional Ecosystems.Science,1971,173:1134~1136.
- [102] 王豁然.论外来树种人工林的可持续经营[M].北京:中国农业出版社,1998,121~129

在读期间发表论文

在读期间发表论文两篇:

- 1 付晓燕,江大勇,黄选瑞,等.黄羊滩不同沙地类型土壤水分特征的研究[J].河北林果研究,2008,23(1):5~7,11.
- 2 付晓燕,江大勇,邢存旺,等.不同类型人工植被防风固沙效益的研究[J].河北林业科技,2008,2,

录用通知

付晓燕同志:

您的论文“不同类型人工植被防风固沙效益的研究”拟在我刊 2008 年 3 期发表,请勿投它刊!



中国科技核心期刊

I S S N 1007-4961
CODEN HLYAF 9

河北林果研究

HEBEI JOURNAL
OF
FORESTRY AND
ORCHARD
RESEARCH

第23卷 第1期

Vol.23 No.1

2008

ISSN 1007-4961

HEBEI LINGUO YANJIU



河北农业大学主办

河北林果研究

第23卷 第1期

总第85期

2008年3月

目次

·林业科学研究·

- 水分胁迫下实生桑苗光合特性的研究 梁君瑛, 周金星, 马履一, 等 (1)
- 黄羊滩不同沙地类型土壤水分特征研究 付晓燕, 江大勇, 黄选瑞, 等 (5)
- 金叶女贞嫩枝扦插生根效果的正交优化 苑海青, 陆贵巧, 谷建才, 等 (8)
- 赤霉素对三种白蜡种子发芽率的影响 曹 兴, 张秀省 (12)
- 榛子开花物候期的研究 李 宁, 苏淑钗 (16)
- 黄连木容器苗造林关键技术的初步研究 马铁民, 李保国, 齐国辉, 等 (20)
- 北京落叶松人工林全林分模型研建 张子强, 王小昆, 熊妮娜, 等 (22)
- 杨属相似品种检索算法的设计与实现 李金戈, 冯秀兰, 周建仁, 等 (26)
- 基于 GIS 和 RS 的地类划分研究分析 周 伟, 陆贵巧, 郭万军 (30)
- 基于遥感的塞罕坝机械林场树种分类研究 杨晓勤, 周 伟 (33)
- 北京市美国白蛾虫害监测信息管理系统研建 余芳艾, 刘 寰, 张莉莉 (37)
- 森林经营方案管理发展研究 高 洁, 黄选瑞, 许中旗 (40)

·果树科学及病虫害研究·

- 土壤镉含量对苹果叶片镉含量及叶绿素含量影响 于祎飞, 邱政芳, 齐国辉, 等 (45)
- 两种方法提取杏基因组 DNA 的比较 杨 丽, 王玉柱, 孙浩元, 等 (49)
- 河北太行山区鲜食枣品种引进筛选研究 王金凤 (52)
- 优质小国光苹果生产周年管理作业历的研究 高尚永, 夏亚利, 马铁民 (56)
- 扁桃的栽培利用及其发展前景 王彩云 (58)
- 枣缩果病研究进展 张朝红, 刘孟军, [周俊义], 等 (62)
- 果树雄性不育机理研究进展 张彦昌, 赵德英, 马 骏 (66)
- 中国美国白蛾生物防治研究进展 张彦龙, 武三安, 郭文霞, 等 (70)
- RNA 沉默及其在病原真菌研究中的应用 杨胜勇, 黄大庄 (78)

·园林绿化与设计·

- 北京市行道树衰弱原因分析及解决对策探讨 张俊民, 李 芳 (82)
- 几种园林绿化树种的夏季移栽试验 郭 军, 李东奇, 孙红梅, 等 (85)
- 都山绣球试管苗移栽的生态条件研究初报 杨福林, 黄守印, 包雪英, 等 (88)
- 北京城市园林绿地冬季效应的研究 刘娇妹, 杨志峰, 李树华, 等 (90)
- 居民潜在国内出游力地区差异及对策研究 王 冰 (94)
- 安徽“丫山花海石林”旅游区门景区的规划设计 张建国, 王国新 (100)
- 景观、生态与文化之路——安国市保衡景观大道设计 刘 丽, 王志成 (105)
- 神农架旅游接待区城镇土地承载力研究 肖云莲, 胡曰利 (109)

[期刊基本参数] CN13-1215/S * 1986 * q * 16 * 112 * zh * P * ¥ 10.00 * 1000 * 29 * 2008-03

本期责编: 刘彦琴

文章编号:1007-4961(2008)01-0005-04

黄羊滩不同沙地类型土壤水分特征研究

付晓燕¹, 江大勇¹, 黄选瑞¹, 邢存旺²

(1 河北农业大学, 河北 保定 071000; 2 河北省林科院, 河北 石家庄 050500)

摘要:土壤水分是干旱及半干旱地区植被恢复的关键因素之一。土壤水分严重影响着退化生态系统的恢复与重建,因此,为了探明黄羊滩沙地土壤水分时空变化规律,在黄羊滩地区取流动沙地、半固定沙地、固定沙地3种不同类型的土样,采用烘干称重法进行分析。结果表明,流动沙地空间尺度上土壤含水量的剧烈变化湿沙层在10~40 cm,稳定层在大于40 cm,时间尺度上土壤含水量9月份高于8月份。侧柏半固定沙丘随着生长季的来临土壤含水量呈下降趋势,7、8月份由于降水的增加含水量有明显的增加。流动沙地在空间尺度上土壤含水量的变化幅度大于固定沙地的土壤含水量。

关键词:黄羊滩沙地;沙地类型;土壤水分;变化特征

中图分类号:S 152.7

文献标识码:A

The research on soil moisture characteristics of different sand land types in Huangyangtan

FU Xiao-yan¹, JIANG Da-yong¹, HUANG Xuan-rui¹, XING Cun-wang²

(1 Agricultural University of Hebei, Baoding 071000, China;

2 Forest Academy of Sciences of Hebei, Shijiazhuang 050500, China)

Abstract: Soil moisture is one of the most important factors, because it affect the comeback and reconstruct of the degenerate ecosystem severely. In order to understand the varying pattern of soil moisture in Huangyangtan sandy land, a study had been carried out in mobile sandy land, immobile sandy land, half-immobile sandy land, with the gravimetric method. There the result suggests: moisture changing layer of soil water moisture is in 10~40 cm in mobile sandy land. Stable layer is above 40 cm. Soil moisture is higher in September than August. Soil moisture is in downtrend in *Platycladus orientalis* forest with its growth, because of moisture increasing in July and August. So soil moisture is increased. Soil water moisture in immobile sandy land is less than mobile sandy land.

Key words: Huangyangtan desert; sandy land type; variation characteristics

在干旱、半干旱地区水分因子是影响植物生存、生长发育和环境对植被支持力的关键因素,植被恢复与重建是防治土地沙漠化的主要措施之一^[1]。土壤水分是联系地表水与地下水的纽带,在水资源的形成、转化及消耗过程中起着重要作用。在不稳定生态系统中,土壤水分状况是系统重要的生态因素,与系统大多数性质和过程都有着直接或间接的关系。并且决定着沙地土壤的发生、演化和土地生产力。此外,土壤水分还是土地荒漠化地区生态系统

稳定、结构和功能正常发挥的关键因子,对整个生态系统的水热平衡起决定作用^[2,3]。同时也是植物生长的最大限制因子,有遏止荒漠化危害的可能性,因此,对荒漠地区土壤水分时空格局及其动态规律进行系统研究,无疑会对荒漠化防治,退化生态系统的恢复与重建,以及对于沙地改良,开发利用,都具有极其重要的意义。由于地理位置不同,水分状况差异很大,影响土壤水分条件变异很大^[4]。黄羊滩地处干旱半干旱过渡地带,为河北坝下中低山区,土壤

收稿日期:2007-12-03;修改稿收期:2008-03-12

基金项目:国家自然科学基金项目(30571489)及国家“十一五”科技支撑项目(2006BAD24B06)共同资助。

作者简介:付晓燕(1979-),女,河北灵寿人,在读硕士研究生,主要从事森林可持续发展的研究。

通讯作者:黄选瑞(1962-),男,教授,博士生导师,主要从事森林可持续经营方面的研究, E-mail: hxr1962@163.com。

水分变化特征有空间和时间的变化规律性,深入研究其不同沙地类型的土壤水分特征,对于合理利用和保护沙地植被与土地资源具有十分重要的意义。

1 研究区概况

黄羊滩位于河北省宣化县洋河南岸,东经 $115^{\circ}2'34'' \sim 115^{\circ}12'30''$,北纬 $40^{\circ}25'12'' \sim 40^{\circ}32'6''$,总面积 $9\,733.2\text{ hm}^2$,处于干旱半干旱过渡地带,为坝下中低山区。地貌特征为山间盆地,主要由流动沙地、半固定沙丘和固定沙地组成。土壤以风积沙土为主,近年来随着沙化程度的加剧,部分地段出现了流动沙丘。黄羊滩地处半湿润区向半干旱区的过渡地带,属华北到蒙新区的过渡性大陆性季风气候类型,特点是雨热同期,光照充足,冬春季寒冷干燥多大风,气候干燥、降水量低、蒸发量大、年均气温 7.6°C ,极端最高气温 38°C ,极端最低气温 -25.8°C ,无霜期 130 d ,年平均日照 $2\,808.8\text{ h}$,年均降水量 $250 \sim 400\text{ mm}$,多集中在7、8月份,年蒸发量 $2\,000\text{ mm}$,为降雨的5.3倍,年平均风速 $2 \sim 4\text{ m/s}$,大风天数 $37 \sim 40\text{ d}$,冬季受蒙古高压气流控制,多西北风,夏季受太平洋气流影响,多西南风。由于其独特的地理位置,形成了风多、风大、干旱、沙打和沙压等特殊的局部气候特征,区内土壤风蚀沙化严重^[5]。

2 研究方法

根据地貌类型特征,试验地划分为流动沙地、半固定沙地、固定沙地。每块试验地各设两块固定小样地(共6块),样地概况见表1。

表1 黄羊滩标准地概况

Table 1 The conditions of different plots

沙地类型	样地号	植物种类	植被盖度/%	林分起源
Sand types	No. plots	Vegetation types	Vegetation coverage	Origin of the forest stand
流动沙地	1	霸王	0.1	天然
	2	霸王	0.1	天然
半固定沙地	3	骆驼刺+杂草	0.3	人工
	4	苜蓿、柠条、沙蒿	0.7	人工
固定沙地	5	沙枣	0.2	人工
	6	侧柏	0.2	人工

从2004年4月26日开始,每月取样2次,直至11月25日结束,采用土壤剖面法,分别在试验地内,从地表向下挖至60 cm,按不同深度(5 cm、15 cm、30 cm、50 cm)分别采取土样,用烘干称重法测量土壤含水量。

3 结果与分析

3.1 土壤水分垂直变化特征

3.1.1 流动沙地的土壤水分变化特征 在黄羊滩地区的沙地上,流动沙地的土壤水分随土壤深度的变化呈现出明显的层次性,根据土壤含水量变化的规律性可把土壤水分分为3个层次,即表层干沙层、中层剧烈变化湿沙层、下层稳定湿沙层。表层干沙层:干沙层一般厚度变化在 $0 \sim 10\text{ cm}$,最高可达 18 cm ,该层在降雨之后土壤含水量迅速升高,含水量变化显著,其变化幅度在 $0.3\% \sim 1.9\%$ 之间,这种变化是荒漠地区高的蒸发量和低的降雨量以及沙地土壤特性综合作用的结果^[6]。中层剧烈变化湿沙层:剧烈变化湿沙层的土层厚度为 $10 \sim 40\text{ cm}$ 之间,土壤含水量在 $0.6\% \sim 3.6\%$ 之间,易受表层温度和湿度变化影响,沙地水分极活跃,是剧烈变化层。下层稳定湿沙层:大于 40 cm 的土层为沙地土壤水分的稳定层,含水量在 $2.1\% \sim 3.0\%$ 之间,该深度的土壤水分受气象影响较小,变化范围也比较小。

表2 流动沙地不同层次土壤平均含水量及变化幅度

Table 2 Soil moisture and changes in different layers of mobile sandy land

层次/cm Layers	5	15	30	50
平均含水量/%	1.5	1.7	2.3	2.7
变化幅度/%	0.3~1.9	0.6~3.6	0.7~3.1	2.1~3.0

3.1.2 半固定沙地的土壤水分随沙地深度变化的土壤水分特征 半固定沙地的土壤含水量,在 $0 \sim 50\text{ cm}$ 范围内随土壤深度的加深,呈现稳步增加的趋势。由图1可知,表层的土壤含水量较低,仅为 0.8% ,在 $15 \sim 30\text{ cm}$ 之间土壤含水量几乎没有变化,一直处于 2.2% 左右,随后在 $30 \sim 50\text{ cm}$ 之间土壤含水量又呈现上升趋势。由于半固定沙地上分布的是草本和灌木,草本植被根系分布比较浅,需求的是表层的土壤水分,并且在这一层土壤蒸发耗水,所以表层含水量比较低。在 30 cm 以下的土层由于土壤水分的下渗,土壤含水量有所增加。

3.1.3 固定沙地土壤含水量与流动沙地土壤含水量比较 固定沙地土壤含水量与流动沙地土壤含水量的比较见图2。流动沙地与固定沙地 0 cm 、 15 cm 、 30 cm 、 50 cm 土壤平均含水量比较,结果表明,固定沙地土壤含水量低于流动沙地的土壤含水量,流动沙地土壤各层水分处于高含水量状态,说明固定沙地上的沙枣和侧柏由于植物蒸腾和土壤蒸发耗水大于流动沙地的草本植物霸王^[7]。

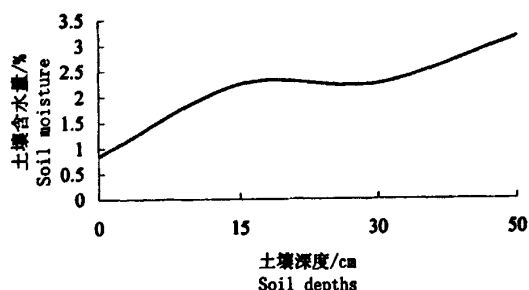


图1 半固定沙地土壤含水量随深度的变化

Fig.1 Soil moisture change with soil depth of half-immobile sandy land

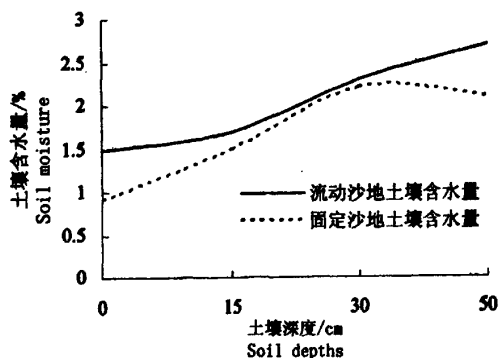


图2 流动沙地与固定沙地土壤含水量比较

Fig.2 Comparison of mobile sandy land and immobile sandy land on soil moisture

3.2 土壤水分时间尺度变化特征

3.2.1 流动沙地土壤水分随时间变化 流动沙地为沙土覆盖的粘质土平地,由霸王(*Sarcosygium xanthoxylon* Maxim.)组成,覆盖度为0.1%。经测定8月份0~10 cm土壤平均含水量为0.7%,10~40 cm土壤平均含水量为2.1%,40~60 cm土壤平均含水量为3.1%,9月份0~10 cm土壤平均含水量为1.5%左右,10~40 cm土壤平均含水量为2.2%,40~60 cm土壤平均含水量为3%。流动沙地的土壤水分月份之间也存在明显的差距,图3是8、9月份不同深度水分动态变化图,从图中可以看出8月份土壤平均含水量小于9月份,一方面8月份降雨为39.5 mm少于9月份的降雨85.3 mm,另一方面8月份地表蒸发量196.1 mm,高于9月份的地表蒸发量123.3 mm,随气温降低,地温也缓慢下降,土壤水分向运动。从15 cm以下,8、9月份的土壤含水量几乎相等,这说明流动沙地的固水、保水性比较低,对降雨的利用很少。

3.2.2 不同沙地类型土壤水分的年际特征 不同沙地类型土壤水分的年际特征见图4。由图4可以

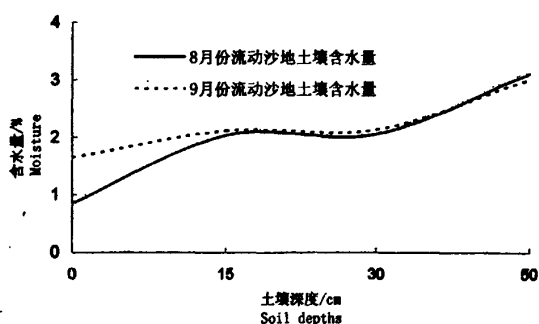


图3 流动沙地土壤含水量随深度变化的8、9月比较

Fig.3 Soil moisture change with depth of mobile sandy land in August and September

看出,1月份固定沙地的土壤含水量达到了10%,明显的高于流动、半固定沙地。

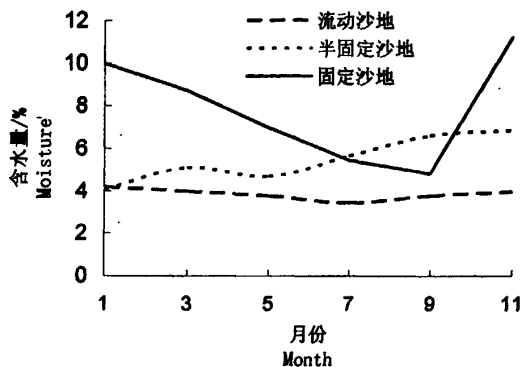


图4 不同沙地类型土壤水分的年际特征

Fig.4 Yearly soil moisture change in different sand types

在年际变化中流动沙地的土壤含水量几乎没有变化,说明流动沙地很难保持水分。半固定沙地的土壤含水量明显的高于流动沙地的土壤含水量,并且从1月至11月呈不断上升趋势。但半固定沙地的变化比较平缓。而固定沙地的土壤水分变化从1月至9月都一直在下降,到9月份下降到最低4.8%。黄羊滩从5月份以后树木开始生长,在固定沙地上栽植的乔木树种,从5月份展叶开始,到7、8月份树冠长到最大,虽然降雨增大,但树冠截流达到最大,所以,此时的土壤含水量低于半固定沙地,9月份以后侧柏树木生长开始变慢,耗水变少,蒸腾量变小,因此土壤含水量开始增加。

4 结论

通过对黄羊滩荒漠不同沙地类型土壤水分特征分析基本得到如下结论,流动沙地土壤水分在空间

(下转第11页)

3 结论与讨论

(1)金叶女贞嫩枝插穗的生根性状主要受激素浓度(B)、枝条部位(C)的影响,各因素影响的主次顺序为枝条部位(C) > 激素浓度(B) > 处理时间(D) > 激素种类(A)。

(2)激素种类、激素浓度、枝条部位和处理时间对金叶女贞嫩枝插穗的根系效果指数的影响均达极显著水平,各因素的变化均影响到插穗的生根性状。

(3)金叶女贞嫩枝扦插的最佳处理组合为采用枝条的中下部做插穗,经 500 mg/L 萘乙酸(NAA)处理 60 min。因本次试验未涉及此组合,如果经试验此组合所得其根系效果指数高于第 9 组,即采用枝条的中下部做插穗,经 100 mg/L ABT2 处理 60 min,则以此为最佳,反之则以第 9 组的试验设计为准。由试验可知第 9 组的生根率为 100%,插穗的平均根系数量为 33.93 条,平均根长为 3.73 cm,根系效果指数为 12.50,此组合为本次试验的最佳组合。

参考文献:

- [1] 沈娟. 金叶女贞的斑点落叶病及其防治[J]. 园林 2001, (9): 38 - 39.
- [2] 白顺江, 纪殿荣, 黄大庄. 树木识别与应用[M]. 北京: 农村读物出版社, 2004.
- [3] 靳艳苏, 高义清, 刘继承. 金叶女贞扦插试验[J]. 河北林业科技, 2000, (4): 15 - 17.
- [4] 袁卉馥, 赵锁江, 于宝海. 金叶女贞快速繁殖方法研究[J]. 陕西农业科学, 2004, (6): 23 - 24.
- [5] 孙金环. 金叶女贞扦插生根试验研究[J]. 河北林业科技, 2005, (1): 9 - 10.
- [6] 王卫成, 贺成英. 不同处理组合对金叶女贞扦插效果的影响[J]. 甘肃农业科技, 2006, (2): 11 - 12.
- [7] 苏金乐. 园林苗圃学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2003.
- [8] 蒋庆琅. 实用统计分析方法[M]. 北京: 北京医科大学中国协和医科大学联合出版社, 1998.
- [9] 张德培, 罗蕴玲. 应用概率统计[M]. 北京: 高等教育出版社, 2000.
- [10] 朱湘渝, 王瑞玲, 黄东森. 欧美杨无性系生根研究[J]. 林业科学, 1991, 27(2): 163 - 167.

(编辑 刘彦琴)

(上接第 7 页)

尺度上, 剧烈变化湿沙层在 10 ~ 40 cm, 稳定湿沙层是大于 40 cm 以下, 这种变化是荒漠地区高的蒸发量和低的降水量以及沙地土壤特性综合作用结果。半固定沙地的土壤含水量在 0 ~ 50 cm 随土壤深度的变化呈上升趋势, 在 15 ~ 30 cm 之间没有变化。在垂直变化中固定沙地土壤含水量低于流动沙地, 为此在流动沙地建立人工植被, 控制适宜栽植密度和选择抗旱植物树种, 是人工植被安全地度过夏季干旱危险期并获得较高生产力的关键^[8]。

流动沙地土壤水分在时间尺度上, 9 月份的土壤含水量高于 8 月份, 是由于 9 月份的降雨大于 8 月份, 而地表蒸发量 9 月份明显的低于 8 月份, 是由于 9 月份的植被生长所需的水分小于 8 月份。黄羊滩 3 种不同类型的沙地, 土壤含水量在年际变化中, 固定沙地土壤含水量变化幅度明显大于半固定沙地和流动沙地的土壤含水量。

参考文献:

- [1] 崔国发. 固沙林水分平衡与植被建设可适度探讨[J]. 北京林业大学学报, 1998, 20(6): 58 - 65.
- [2] 黄秉维, 郑度, 赵名茶, 等. 现代自然地理[M]. 北京: 科学出版社, 2000. 258 - 277.
- [3] Andrew J, Baird, Robert L. 赵文智, 王根绪译. 生态水文学[M]. 北京: 海洋出版社, 2002. 55 - 81.
- [4] 陈有君. 内蒙古浑善达克沙地土壤水分状况的分析[J]. 干旱区资源与环境, 2000, 14(1): 156 - 161.
- [5] 孟树标, 温素卿, 王超. 黄羊滩风蚀沙地地表风蚀量的研究[J]. 河北林业科技, 2006, (1): 5 - 6.
- [6] 刘发民. 荒漠地区柽柳人工固沙林土壤水分动态[J]. 西北植物学报, 2000, 21(5): 937 - 947.
- [7] 秦佳琪, 托亚, 叶冬梅, 等. 乌兰布和沙漠不同沙地类型土壤水分特征的研究[J]. 内蒙古农业大学学报, 2004, 25(2): 23 - 26.
- [8] 张文军. 毛乌素沙地土壤水分的影响因素及消长规律[J]. 内蒙古林业科技, 1996, (3): 21 - 28.

(编辑 刘彦琴)

- 中国科技核心期刊
- 《万方数据——数字化期刊群》全文上网期刊
- 《中国科学引文数据库》来源期刊
- 《中国期刊全文数据库》全文收录期刊
- 《中国学术期刊综合评价数据库》来源期刊
- 《中国期刊网》、《中国学术期刊(光盘版)》全文收录期刊
- 《中文科技期刊数据库》原文收录期刊
- 《中国林业文摘》源刊
- 《中国农业文摘》源刊
- 《中国生物学文摘》源刊
- 获全国高校优秀学报
- 获河北省高校优秀学报
- 获河北省优秀期刊

河北林果研究
HEBEI LINGUO YANJIU
(季刊)(1986年创刊)

2008年 第23卷 第1期(总第85期)

HEBEI JOURNAL OF
FORESTRY AND ORCHARD RESEARCH
(Quarterly)(Started in 1986)
Vol.23 No.1(Sum.85)2008

主管单位: 河北省教育厅
主 办: 河北农业大学
编辑出版: 河北林果研究编辑部
保定市河北农大东校区 071001
0312-7526750, 7526751
E-mail: xuebaolin@hebau.edu.cn
主 编: 王志刚
副 主 编: 马峙英 杨华生(常务)
发行范围: 国内外公开发行
国内总发行: 保定市邮政局
国内订购: 全国各地邮局
(邮发代号: 18-256)
国外总发行: 中国出版对外贸易总公司
(北京 782信箱 邮编 100011)
印 刷: 保定华泰印刷有限公司

Responsible Institution: The Education Department of
Hebei Province
Sponsored by Agricultural University of Hebei
Edited by Ed. Dept. of Hebei Journal of
Forestry and Orchard Research
(Baoding, Hebei, China 071001)
Editor-in-Chief: Wang Zhigang
Associate Editors-in-Chief: Ma Zhiying, Yang Huasheng
Distribution Scope: World Wide
Distributed by Baoding Post Office
Abroad Distribution: China Publishing Foreign
Trade Corporation (P.O.B. 782, Beijing)

作者简介

姓名：付晓燕

性别：女

出生年月：1979 年 07 月

籍贯：河北省灵寿县

最后学历（学位）：硕士研究生

教育经历：2000 年 9 月——2003 年 6 月 河北农业大学林学院 林果技术与推广 大专

2005 年 9 月——2008 年 6 月 河北农业大学林学院 森林经理学 农学硕士

工作经历：2003 年 7 月——2005 年 1 月 河北容泰日化有限公司 业务

在读期间参与研究项目：

- 1 国家自然科学基金(30571489)、时间：2006-2008 年、来源：国家自然科学基金委、排名：第五、外业调查及研究报告的撰写。
- 2 科技部“十一五”科技支撑项目(2006BAD03A11-5)、时间：2006-2010、来源：科技部、排名：第八、外业调查。

在读期间发表论文两篇：

- 1 付晓燕,江大勇,黄选瑞,等.黄羊滩不同沙地类型土壤水分特征的研究[J].河北林果研究,2008,23(1):5~7,11.
- 2 付晓燕,江大勇,邢存旺,等.不同类型人工植被防风固沙效益的研究[J].河北林业科技,2008,2,

致 谢

时光荏苒，日月如梭，在三年的硕士学习生活即将结束之际，回忆往昔，收获颇丰；展望未来，踌躇满志。三年来尊敬的导师黄选瑞教授在学习、工作和做人方面给予了我谆谆教诲和无私关爱。导师严谨求实、勇于创新、博采众长和精益求精的治学态度，以及对人生的独到见解，是我为人做事、求学求真的航标。在课题研究的过程中，自始至终得到导师的悉心指导，从毕业论文的设计、外业调查以及调查资料的分析与整理，到毕业论文的撰写，无不倾注了导师的大量心血。值此论文完成之际，谨向尊敬的黄选瑞导师表示衷心的感谢和崇高的谢意。

本论文的研究属于科技部“十一五”科技支撑项目（2006BAD03A11-5）课题，在项目研究内容、调查方案设计、研究工作进度安排等的确定过程中，得到了李永宁副教授、许中旗副教授的帮助和指导。

外业调研过程中，得到黄羊滩林场厂长李淑贵、副厂长杨富贵的大力支持，以及邢存旺博士、赵广智技术员的直接关照和帮助，并得到黄羊滩林场所有职工的大力支持，使得外业调查和数据的取得能够顺利完成。

此外，感谢家人对我的鼓励和支持，感谢师弟江大勇、师妹曹立颜在外业调查过程中给予我的帮助，感谢同班兄弟姐妹们对我生活上的关心以及李金兰、李秋娟、刘宏霞等同门师弟师妹们对我的照顾。

最后，再次向所有曾经关心、支持和帮助过我的人们表示衷心的感谢！

付晓燕

2008年6月