

# 樟子松人工固沙林稳定性的研究<sup>\*</sup>

曾德慧 姜凤岐 范志平 朱教君

(中国科学院沈阳应用生态研究所, 沈阳 110015)

**【摘要】** 提出了人工林稳定性的内涵及其评价标准. 分析了影响沙地樟子松人工林稳定性的各种干扰因子, 通过对沙地樟子松人工林造林成活、生长情况、对不良外界环境的抵御能力、林分寿命、林分结构和生产力的综合评价分析, 认为沙地樟子松引种人工林基本上是稳定的; 而生长在立地较好的丘间低地的林分, 其稳定性大于沙丘顶部的林分; 从抗枯梢病角度看, 幼林的抗性大于中林; 从林分密度和生产力角度来看, 红花尔基沙地樟子松林稳定性高于章古台.

**关键词** 沙地 樟子松 人工林 稳定性

**Stability of Mongolian pine plantations on sandy land.** Zeng Dehui, Jiang Fengqi, Fan Zhiping and Zhu Jiaojun (*Institute of Applied Ecology, Academia Sinica, Shenyang 110015*). -*Chin. J. Appl. Ecol.*, 1996, 7(4):337~343.

This paper defines the meaning of artificial forest stability and its evaluating standards. The various disturbing factors affecting the stability of Mongolian pine plantation on sandy land were analyzed. Detailed studies were carried out on evaluating the survival degree of planting, the growth, the ability of resisting the adverse circumstances, life length, and the structure and the productivity of forest stand. Results show that the artificial forest stands of Mongolian pine introduced to sandy land are basically stable. The stands growing on low sand dunes are more stable than those growing on high sand dunes. The young forests have higher disease-resistance than do the middle-aged forests. According to the density and the productivity of it, the stand growing on Honghuaerji sand land is more stable than in Zhanggutai.

**Key words** Sandy land, *Pinus sylvestris* var. *mongolica*, Plantation, Stability.

## 1 引言

自1977年肯尼亚内罗毕联合国荒漠化会议之后, 土地荒漠化成为国际上公认的一个严重的生态环境和社会经济问题. 1992年巴西里约热内卢世界环境与发展大会上, 土地荒漠化问题再次成为全球环境问题的热点. 土地沙漠化是荒漠化的重要组成部分. 我国的沙漠、戈壁及沙漠化土地面积达 $1.49 \times 10^6 \text{ km}^2$ , 占全国国土总面积的15%, 其中对国民经济和人民生活环境危害最大的沙漠化土地面积为 $3.34 \times 10^5 \text{ km}^2$ , 而且沙漠化土地面积还在扩大<sup>[2]</sup>. 因此, 防治沙漠化是我国的一项刻

不容缓的任务. 营造防护林体系是防治流沙、改造利用沙地的根本途径, 也是沙区保护农牧业生产和林业建设的重点工作. 由于樟子松(*Pinus sylvestris* var. *mongolica*)适应性强, 它正被用作“三北”广大风沙干旱、半干旱地区的主要造林树种之一.

位于科尔沁沙地东南边缘的章古台是最早在沙地引种樟子松的地区. 从1955年开始引进樟子松固沙造林, 先后营造了樟子松林10700  $\text{hm}^2$ , 现已蔚然成林, 防风固沙作用显著, 有效地抑制了“沙龙”向前推进, 而且正成为“三北”地区营造樟子松林

<sup>\*</sup> 国家自然科学基金资助项目.

1995年12月26日收到, 1996年9月5日改回.

的主要种源基地.但随着林龄的增加,自70年代末以来,林分地下水位、土壤含水量和根栖层养分含量均出现降低的趋势<sup>[9,10]</sup>;80年代末,部分樟子松林发生了枯梢病,生长下降,特别是高生长缓慢,甚至趋于停止,个别林木濒于死亡,樟子松林表现出一定的不稳定性.稳定性是生态系统存在的必要条件,在理论和实践中具有深远意义,被公认是生态系统的一个重要特征,也是人们了解生态系统的一个极其重要的概念<sup>[5,12,14]</sup>.当前,人类面临人口、资源与环境等问题,究其本质,就是系统的稳定性问题.这些问题的解决在很大程度上依赖于生态系统稳定性的研究.因此,研究沙地樟子松林稳定性的机理,为经营好现有樟子松林和今后营造樟子松林提供指导,具有重要的理论价值和实践意义.

## 2 研究地区概况与研究方法

### 2.1 研究地区概况

本研究对象为章古台和红花尔基沙地樟子松林.两地自然概况见文献<sup>[8]</sup>.

### 2.2 研究方法

**2.2.1 标准地调查** 在研究地区共调查标准地35块,作解析木10株,另外收集红花尔基沙地天然林解析木10株.调查内容主要包括沙地类型、每木检尺、树高、年龄、疏密度、冠幅等.

**2.2.2 土壤含水量观测** 在章古台林地选取年龄、立地、密度不同的林分5块及1块无林地作为对照,分0~10、10~20、20~30、30~50、50~70、70~100 cm土层,每半个月观测1次,以烘干法测定,观测期从1993年6月至1994年6月.

## 3 结果与分析

### 3.1 影响沙地樟子松人工林稳定性的干扰因子

干扰是时间序列中任何相对明显的引起对生态系统、群落或种群结构的破坏和造成资源基底有效性或自然环境变化的事

件<sup>[6]</sup>.按照干扰来源的差别,可将干扰分为自然干扰和人为干扰.与自然干扰相比,人为干扰更具有可控性,为造林、营林及其它生态设计提供了可能.因此,在研究干扰对生态系统稳定性影响时,应注意干扰的强度和频率.人类对森林的合理经营,可看作是一种积极的有效的干扰.

当在稳定性的框架上研究森林生态系统的行为时,必须首先考虑影响稳定性的干扰因子.区分单个因子的影响是必要的,因为只有了解各个干扰因子和它们的强度、出现频率和它们对生态系统稳定性的影响后,才能够采取相应的措施,使森林生态系统的稳定性得到加强<sup>[17]</sup>.

在沙地樟子松人工林生态系统里,产生负效应的干扰因子主要有:1)非生物因子:气象、土壤因子的扰动;2)生物因子:病虫害;3)人为因子:人为用火导致的火灾和枯枝落叶被人搂走作薪柴用.

**3.1.1 气象因子的扰动** 由于受太阳黑子活动和大气环流的影响,气象因子产生扰

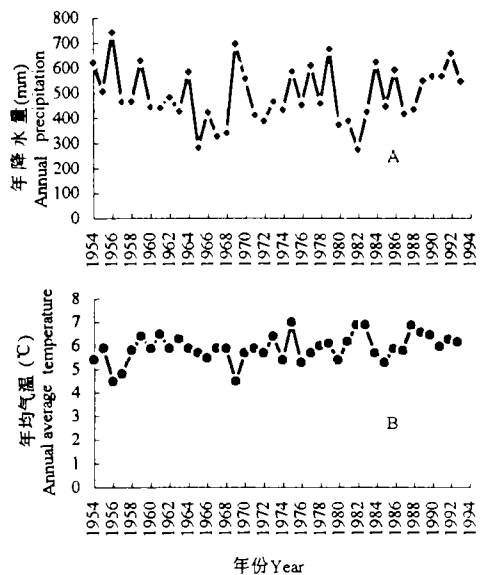


图1 章古台年降水量(A)与年平均气温(B)

Fig. 1 Annual precipitation (A) and annual average temperature (B) in Zhanggutai region.

动.章古台各年的降水量、气温变化情况如图 1 所示.

从 1954~1993 年的 40 a 间平均降水量为 495.7 mm, 最大降水量的 1956 年达 744.8 mm, 最小降水量的 1982 年只有 276 mm, 两者相差达 468.8 mm. 进一步分析得到标准差  $\sigma = 114.06$ , 变动系数  $v = 0.23$ . 为了评价该地区的干旱程度, 可选用旱涝指标<sup>[1]</sup>来表示, 即

$$I = x_i - \bar{x} / \sigma \quad (1)$$

式中,  $I$  为旱涝指数,  $x_i$  为某地某年的降水总量,  $\bar{x}$  为该地历年平均降水量,  $\sigma$  为年降水量的标准差.  $-1 < I < 1$  为正常年;  $-2 \leq I \leq -1$  为干旱年;  $I < -2$  为大旱年. 由方程(1)计算得出: 在樟子松引种后的 39 a 里, 不正常年有 12 a; 干旱年(降水量低于 381 mm)的年份有 5 a, 分别是 1965、1967、1968、1980 和 1982 年, 其中 1965、1982 两年接近大旱年.

对气温作同样分析得到 40 a 的平均气温为 5.9℃, 标准差 0.58, 变动系数 0.10. 在变动系数范围以内的年份(5.3~6.5℃)为气温正常年; 超出这个范围的为不正常年, 共有 8 a. 可以认为, 降水量的变动系数大于气温, 说明降水量的扰动大于气温, 尤其是年降水量低于 381 mm 的年份, 造成土壤水分供应不足, 产生严重干旱. 樟子松进入中龄后需水量增多, 一旦遇到干旱则生长明显下降, 极易造成林分的不稳定.

不同年份的气象因子不仅在年变化中存在明显差异, 而且每年的同一月份也差异明显. 林木生长受土壤水分多少的影响很大, 而降水是本地区土壤水分的主要来源, 由于樟子松高生长在短期内完成, 5 月底基本停止生长, 而 4、5 月的蒸发量都很大, 因此, 在樟子松树高生长停止前的一段时期的降水多少对树高生长有明显影响.

3.1.2 土壤因子的扰动 通过对章古台地区 5 块标准地(见表 1)和 1 块无林地(固定沙地)进行土壤含水量的测定, 得出不同沙丘部位的樟子松林涵养水分的能力明显不同(图 2、3). 章古台地区林木直径生长与当年降水量有直接相关, 土壤水分在整个生长季内影响着林木的直径生长. 樟子松高生长在短期内完成, 5 月底基本停止生长, 土壤水分在短时间内影响树高生长, 即在 5 月底以前的降水量影响着樟子松的高生长.

表 1 章古台地区林分概况

Table 1 Situation of five stands in Zhanggutai region

No.	沙丘部位 Dune position	I	II	III	IV
110	沙丘底部 Lower dune	15	1250	11.4	5.51
111	沙丘顶部 Top dune	15	1325	9.6	4.25
113	平坦沙丘 Plane dune	17	1684	9.1	4.78
101	平坦沙丘 Plane dune	39	1400	15.9	10.02
102	沙丘底部 Lower dune	39	1341	16.0	11.36

I. 林龄 Age (yr.); II. 密度 Density (stems · hm<sup>-2</sup>); III. 胸径 DBH (cm); IV. 树高 Height (m).

综观各标准地土壤水分的季节变化, 有如下特征: 各林地土壤水分随降水而呈明显的季节变化, 一般可划分为雨季前、雨季和雨季后 3 个阶段, 全年土壤含水量有 2 个低峰, 一次为雨季前的 5~6 月, 另一次为雨季后封冻前的 9、10 月, 雨季 7、8 月降水量最大, 土壤含水量最高, 无林地也表现出这个趋势(图 2). 章古台地区樟子松林土壤含水量随降水而呈明显的季节变化, 反映了该地区土壤对水分的调节能力弱, 林木易于受旱. 不同立地类型土壤含水量随时间变化差异明显(图 2). 102、110 号标准地为丘间低地, 含水量明显高于 101、111、113 号标准地, 反映了丘间低地的林地土壤贮存水分的能力强于其他立地条件的林地.

樟子松的根系主要分布在 30~50 cm 土层, 水分的吸收也主要集中在这层土层内, 各林地土壤含水量变化的测定也证明

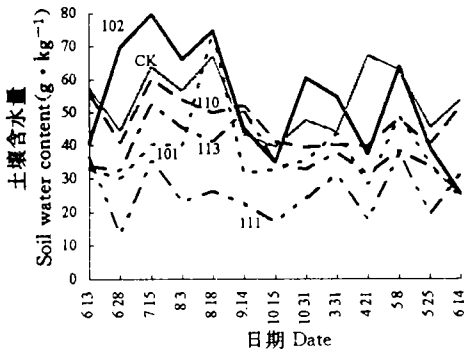


图2 林地土壤水分年变化

Fig.2 Change of soil water with time in different plots.

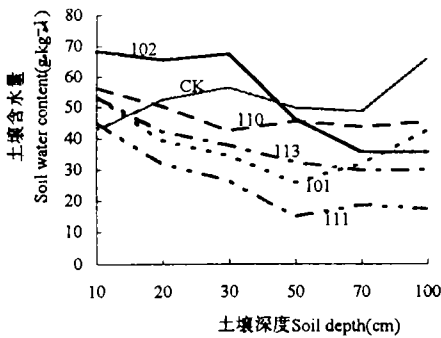


图3 土壤水分随土壤深度变化

Fig.3 Change of soil water with soil depth in different plots.

了这一点(图3). 需要指出的是, 由于沙地降水量不足, 当根系层土壤水分不能满足樟子松所需时, 樟子松必然要利用地下水, 这就导致了 50~70 cm 土层的含水量明显低于 10~20 cm 土层的含水量(图3). 林地 10 cm 土层的含水量高于无林地, 说明营造樟子松后, 林地土壤表层物理蒸发小于无林地.

樟子松林土壤养分含量在表层的有机质与 N、P 含量比流沙显著增加, 而下部沙层出现一定的降低趋势<sup>[10]</sup>, 说明在营造樟子松林后沙地表层土壤的养分得到一定改善, 而在根栖层的养分变得越来越少, 对本来就缺少养分的沙地林分生长极为不利.

### 3.1.3 生物干扰因子——病虫害 章古台

地区樟子松人工林发现有枯梢病, 在部分感病地块, 受害株数达 97.5%, 濒死及死亡株数达 19.0%<sup>1)</sup>. 受害木在林中呈团状分布, 新梢或针叶枯黄, 树冠下部受害较上部为重; 幼苗与 30 年生以上大树受害较重. 初步认为章古台地区的樟子松枯死的直接原因是枯梢病所致. 真菌病原物为松色二孢菌(*Diplodia pinea*), 属于弱寄生, 只有当树势生长衰弱时, 病菌才从伤口侵入, 并造成严重危害<sup>[7]</sup>. 可以认为, 造成樟子松生长衰弱的原因是综合因素的结果: 樟子松自然分布为北纬 48 度左右, 引种到低纬度地区后, 由于年平均气温比原产地高近 10℃, 导致樟子松不能适应和提早成熟; 章古台地区为干旱的半湿润地区, 降水量小, 地下水位过低, 树木经常遭受干旱; 沙地养分不足, 尤其是 N、P 缺乏; 林分密度过大. 各种虫害特别是刺吸式口器的害虫, 是病菌侵入危害的诱因.

在幼林阶段, 特别是造林后 1~3 a, 部分樟子松幼树遭受金龟子幼虫的为害, 该幼虫为害樟子松的根部, 啃食须根和韧皮, 致使整株樟子松死亡. 松毛虫是为害樟子松林的主要针叶害虫之一, 但与油松相比为害程度要低 30~50%, 表现出樟子松对松毛虫的抗性较强.

3.1.4 人为干扰因子 很明显, 森林火灾对人工林稳定性来说是一个致命的干扰因子. 章古台地区樟子松人工林每年都有数次火灾发生, 每次受害面积从 1~10 hm<sup>2</sup> 不等, 例如, 仅 1994 年 2~5 月就发生大小火灾共 7 次, 面积达 30 hm<sup>2</sup>. 因此控制这些人为火灾的发生是维持沙地樟子松人工林稳定性的一项重要措施.

在一个稳定的森林生态系统里, 生物循环可以维持绝大部分元素不受损失. 章

1) 辽宁省林学会森林保护专业委员会. 1992. 章古台地区樟子松枯死情况考察报告(内部材料).

表 2 红花尔基、章古台樟子松林测树因子  
Table 2 Surveying factors of Mongolian pine stands in Honghuaerji and Zhanggutai

地 点 Loca- tion	标准地号 Plot No.	沙丘部位 Dune position	林 龄 Age (yr.)	密 度 Density (stems·hm <sup>-2</sup> )	胸 径 DBH (cm)	树 高 Height (m)	材 积 Volume (m <sup>3</sup> ·hm <sup>-2</sup> )	年均材积生长量 Annual average volume (m <sup>3</sup> ·hm <sup>-2</sup> )
HHEJ	309	平坦沙丘 Plane dune	22	3467	11.8	10.43	191.33	8.70
	312	平坦沙丘 Plane dune	26	1617	13.9	8.78	104.24	4.01
	313	平坦沙丘 Plane dune	26	1850	13.4	7.87	99.34	3.82
	314	沙丘顶部 Top dune	27	1600	16.5	9.34	154.60	5.73
	305	沙丘中上坡 Mid-top dune	29	1417	17.0	9.44	146.90	5.07
	304	沙丘中部 Middle dune	31	407	22.6	12.01	94.87	3.06
	302	沙丘中部 Middle dune	32	1533	14.1	10.00	115.81	3.62
	301	沙丘顶部 Top dune	34	1233	15.7	9.50	109.72	3.23
	316	平坦沙丘 Plane dune	35	1031	17.3	10.02	117.49	3.36
	307	平坦沙丘 Plane dune	48	300	30.4	17.11	180.26	3.75
	306	沙丘底部 Lower dune	65	356	33.6	16.80	256.58	3.95
	308	沙丘顶部 Top dune	67	591	26.0	15.70	238.35	3.58
	211	丘间低地 Lower dune	13	2650	8.9	5.22	41.64	3.20
	210	沙丘中部 Middle dune	14	1600	7.4	3.91	13.02	0.94
	ZGT	沙丘底部 Lower dune	15	1250	11.4	5.51	34.01	2.27
		沙丘顶部 Top dune	15	1325	9.6	4.25	19.72	1.31
		沙丘中下部 Mid-lower dune	15	2346	9.1	5.60	41.34	2.76
		沙丘顶部 Top dune	16	2467	6.9	4.10	18.30	1.17
		丘间低地 Lower dune	16	2850	8.9	5.00	42.52	2.66
		平坦沙地 Plane dune	17	1684	9.1	4.78	25.33	1.49
		平坦沙地 Plane dune	18	3357	8.8	6.07	59.96	3.33
		沙丘顶部 Top dune	20	3350	8.2	5.36	45.88	2.29
		沙丘底部 Lower dune	21	2825	8.8	5.62	46.72	2.22
		平坦沙丘 Plane dune	22	2163	10.5	6.91	62.62	2.85
		平坦沙丘 Plane dune	22	1211	12.7	7.05	52.33	2.39
		沙丘顶部 Top dune	22	750	13.2	6.63	32.92	1.51
		平坦沙丘 Plane dune	24	1425	12.0	6.88	53.65	2.25
		沙丘顶部 Top dune	24	878	12.9	6.14	34.09	1.42
		沙丘顶部 Top dune	24	807	12.5	6.50	31.15	1.29
		平坦沙丘 Plane dune	26	364	22.6	8.67	61.25	2.36
		丘间平地 Plane dune	26	1227	13.2	6.63	53.86	2.08
		沙丘底部 Lower dune	33	1322	16.4	10.13	136.87	4.15
		沙丘中部 Middle dune	37	1184	15.6	9.69	106.10	2.87
		平缓沙丘 Plane dune	39	1400	15.9	10.02	134.76	3.46
		沙丘底部 Lower dune	39	1341	16.0	11.36	148.19	3.79

HHEJ: 红花尔基 Honghuaerji; ZGT: 章古台 Zhanggutai.

古台地区由于缺柴, 每年枯枝落叶都被人拾走作薪柴用, 使得养分循环的通道受到破坏, 养分元素大量损失, 对于樟子松人工林维持其稳定性极为不利.

3.2 稳定性评价

稳定性一词用于表达生态系统对抗动的反应. 生态学家把生态系统对干扰的反

应分成两个方面, 即当系统受到干扰时, 抵抗偏离初始态的能力和受到扰动之后返回初始态的能力<sup>[4, 13, 16]</sup>. 由于稳定性具有多个特征, 其稳定性的定量评价也十分困难, 因此, 本文重新定义人工林稳定性, 其内涵应理解为: 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顺

利完成其生命周期,并提供相应的净初级生产量的能力。

根据人工林稳定性内涵,考虑人工林的结构与功能特征,提出以下评价其稳定性的标准:1)人工林能否顺利成活.成活情况可以简单分成3类:①顺利成活,要求成活率达60%以上;②基本成活,成活率达40~60%;③难成活,成活率40%以下;2)能否正常生长.稳定性强的人工林要求在一定时期内能保持旺盛的生长,高生长量不降低,速生期不缩短;3)寿命的长短.稳定性强的人工林要求不出现早衰现象;4)对不良环境的抗御能力.稳定性强的人工林要求不因为过于严酷而死亡;5)林分结构是否合理;6)林分的生产力大小。

从生态学和造林学观点来看,空间大小决定资源利用的数量、成林的机会、保护的程地,它们还决定恢复的模式、比例和速度,并且在一定条件下,决定种与种之间的新的组成和返回初始态的可能性<sup>[15]</sup>.时间上的稳定性总是和空间上的变化联系在一起;空间上的统一性是时间变化的结果.时间因子本身与森林生长和变化紧密地联系在一起.因此,在评价森林生态系统稳定性时,时间和空间的尺度是必需的,这个尺度包括各种干扰有效发生的机会.对沙地樟子松人工林而言,其稳定性应在林分水平,研究一个世代跨度。

**3.2.1 成活情况** 章古台地区近40 a的造林实践,在正常降水年份,选用优质苗木造林成活率可达75~85%,充分证明樟子松在该地区的造林能够顺利成活,在幼林阶段能适应当地的立地条件。

**3.2.2 林分生长状况** 2个地区共调查了35块樟子松纯林标准地(表2).对年龄相同或相近的林分比较发现:同一地区林分的高生长和胸径生长主要受林分密度和沙丘部位的影响,密度越大,胸径和树高就越

小,特别是胸径的差异更大;丘间低地的林分比顶部的生长效果要好.对2个地区的林分比较得到:同一年龄的林分树高生长红花尔基>章古台;胸径生长差异不明显。

**3.2.3 寿命的长短** 红花尔基沙地上的樟子松树高和胸径的旺盛生长期可延续到60~70 a,数量成熟期约为100 a.章古台人工林30年生树高生长开始出现平缓,年生长量为20 cm;胸径生长在30 a生左右开始减弱,年生长0.2~0.3 cm.由于章古台纬度低于红花尔基,气温高,蒸发量大,樟子松林的数量成熟期缩短,为46 a<sup>[8]</sup>。

**3.2.4 对不良环境的抗性** 樟子松具有庞大的主侧根,在固定沙丘和流动风沙土等均能成活生长,表现出耐干旱瘠薄等特性,即使在较干旱的年份,樟子松也表现较强的抗干旱能力,但遇到特别干旱的年份(如1982年的降水量比平均值低40%),林木提前落叶,生长明显降低,严重者出现干枯状况<sup>[10]</sup>.对干扰因子分析表明樟子松对松毛虫表现出较强的抗性.对于枯梢病,年龄较大的樟子松表现较弱的抗性,甚至部分林木濒于死亡,说明樟子松年龄越大对枯梢病的抗性越弱。

**3.2.5 林分密度** 森林的群体结构是指森林的各组成成分的空间分布格局,它是森林植物和环境之间以及森林植物彼此之间相互作用的表现形式,合理的群体结构能使整个林分获得最高产量,林分达到较高的稳定性.对同龄的人工纯林来说,密度是形成林分结构的最重要的因子。

从章古台标准地调查发现,多数林分的密度比理论值<sup>[11]</sup>要偏高,如108号标准地比理论值高出181%,112号和107号标准地也高出1倍多.林分密度过大,导致蒸腾耗水量增大,是地下水位下降、土壤含水量降低的主要原因之一,也是影响林木生长量下降、生长势减弱的主要原因。

**3.2.6 林分的生产力** 净初级生产力可以表示该立地条件下的生产力,它是评价人工林生态系统稳定性的一个重要的生产力指标。净初级生产力用年均材积生长量来代替。根据同一生长期平均生长量的大小来比较树种在不同条件下生长的快慢和好坏<sup>[3]</sup>,可判断其稳定性。表4列出了红花尔基和章古台的樟子松林分测树因子及年均材积生长量。从表4可以看出,红花尔基的樟子松林生产力大于章古台。材积是单位面积株数、林木胸径和树高的函数,只有结构良好的林分才有较高的生产力。

## 4 结 论

**4.1 樟子松在章古台沙地引种能正常成活和生长**,所以基本上是稳定的,但数量成熟提前。丘间低地的林分稳定性高于沙丘顶部;密度小的林分高于密度大的;从对枯梢病的抗性来看,幼林大于中林;原产地红花尔基的樟子松林的生产力及稳定性高于章古台。

**4.2 影响章古台地区沙地樟子松林生长的主要生态因子——降水不稳定,扰动较大,容易发生干旱**;另外章古台地区沙地樟子松人工林密度过大,导致土壤含水量下降,使林分生长降低,严重影响着这些人工林的稳定性。

**4.3 章古台地区樟子松林存在严重干扰因子——枯梢病**,如果防治不力,将造成林分不稳定,生长下降,严重者导致林木死亡。

**致谢** 承蒙焦树仁高级工程师的大力帮助,并提供章古台气象资料,特此致谢。

## 参考文献

- 1 北京林学院(主编). 1981. 气象学. 北京:中国林业出版社.
- 2 朱震达、王 涛. 1991. 中国北方的土地沙漠化问题. 中国科技导报, (4):55~57.
- 3 关玉秀(主编). 1987. 测树学. 北京:中国林业出版社.
- 4 何芳良. 1988. 生态系统的复杂性及稳定性. 生态学进展, 5(3):157~162.
- 5 周集中、马世骏. 1990. 生态系统稳定性. 现代生态学透视(马世骏主编). 北京:中国科学技术出版社. 54~71.
- 6 郭林海. 1991. 景观异质性对干扰传播的影响及其预测. 景观生态学——理论、方法及应用(肖笃宁主编). 北京:中国林业出版社.
- 7 项存梯. 1981. 樟子松枯梢病的研究. 东北林学院学报, (2):1~10.
- 8 姜凤岐、曾德慧等. 1996. 沙地樟子松林单木生长的研究. 应用生态学报, 7(增刊):1~5.
- 9 焦树仁. 1984. 樟子松人工林蒸腾耗水量的初步研究. 生态学杂志, 3(4):15~18.
- 10 焦树仁. 1989. 章古台固沙林生态系统的结构与功能. 沈阳:辽宁科学技术出版社.
- 11 曾德慧、姜凤岐. 1995. 从水量平衡角度探讨沙地樟子松人工林的合理密度. 防护林科技, (1):4~7.
- 12 Hill, A. R. 1987. Ecosystem stability: some recent perspectives. *Progress in Physical Geography*, 11 (3):315~333.
- 13 Holling, C. S. 1973. Resilience and stability of ecological systems. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 4:1~23.
- 14 Ives, A. R. 1995. Measuring resilience in stochastic systems. *Ecological Monographs*, 65(2):217~233.
- 15 Miegroet, M. Van. 1980. The basic concept of forest stability. In: *Proceedings of International Symposium on Stability of Spruce Forest Ecosystems*. Published by the University of Agriculture. Brno. Czechoslovakia.
- 16 Oriens, G. H. 1975. Diversity, stability and maturity in natural ecosystems. In: *Unifying Concepts in Ecology*. W. H. Doen and R. H. Lowe-McConnell (eds). Dr. W. Junk B. V. Publishers, The Hague.
- 17 Thomasius, H. 1980. The stability and factors affecting the stability in the management of spruce stands in the German Democratic Republic. In: *Proceedings of International Symposium on Stability of Spruce Forest Ecosystems*. Published by the University of Agriculture. Brno. Czechoslovakia.