

综合构成指数在森林生态系统健康评估中的应用

陈 高¹, 邓红兵^{2*}, 代力民³, 吴 钢²

(1. 北京师范大学环境学院, 北京 100875; 2. 中国科学院生态环境研究中心系统生态重点实验室, 北京 100085;
3. 中国科学院沈阳应用生态研究所, 沈阳 110016)

摘要:首次提出综合构成指数(Integrated Compose Index, *ICI*)模型 $ICI = \ln(\sum B \times \sum IV \times CAV)$ 。通过选取目前长白山阔叶红松林生态系统区主要林分类型(原始阔叶红松林, 不同干扰模式造成的择伐林、次生白桦林和人工落叶松林等)共 29 块样地进行群落结构和生物量调查, 以原始阔叶红松林作为健康基准, 定量评估了各受损生态系统的健康现状及恢复趋势。结果表明综合构成指数是一种易操作的能定量描述受干扰系统健康差距的度量方法。利用分层[主林层($H \geq 18\text{m}$)、亚主林层($18\text{m} > H \geq 10\text{m}$)、演替层($10\text{m} > H \geq 2.5\text{m}$)和更新层($H < 2.5\text{m}$)]的综合构成指数值可定量不同干扰模式造成的受损系统与健康基准之间的健康差距。健康基准是 12.77, 与之差距越大, 表明受干扰破坏越大, 系统健康程度越低。29 块样地分为 8 个类型, 6 个受干扰类型依距离原始健康基准的远近排序为: 结构转换型 $0.64 <$ 结构破坏型 $0.75 <$ 结构保留型 $0.85 <$ 严重干扰类型 $1.95 <$ 白桦林系列 $2.07 <$ 人工落叶松系列 2.89 。综合构成指数的上层(主林层和亚主林层)指数能表示群落结构现状和目前处于演替阶段的位置; 下层(演替层和更新层)指数能表示群落向健康基准类型恢复的潜力, 值越大, 潜力越大。上下两层综合能说明群落受到干扰的强度和后果。上下两层差值 D 对于阔叶红松林生态系统来说, 健康基准类型 D 位于 $0.28 \sim 0.35$ 之间, 如 $0 < D < 0.28$ 说明目前群落结构还是针阔混交类型, 但群落上层的针叶树(主要是红松)比例明显减少; 或者群落受干扰, 下层结构活跃, 红松更新现象明显。 $D > 0.35$ 说明群落主林层和亚主林层的阔叶树种受到干扰破坏, 且红松更新困难或还没大量更新。 $D \leq 0$ 说明群落遭受很大强度的干扰, 如 70% 以上的生物存量被破坏取走, 或直接导致裸地重新发育演替的白桦林、营造人工落叶松林等情况, 差值 D 越大, 红松的侵入程度越高, 红松更新状况良好, 该群落向顶级恢复的趋势良好。

关键词:生态系统健康; 综合构成指数; 阔叶红松林; 干扰

文章编号: 1000-0933(2005)07-1725-09 中图分类号: Q14, S718.5 文献标识码: A

Health assessment on forest ecosystem by using integrated compose index (*ICI*)

CHEN Gao¹, DENG Hong-Bing^{2*}, DAI Li-Min³, WU Gang² (1. School of Environment, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 2. Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China; 3. Institute of Applied Ecology, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China). *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(7): 1725~1733.

Abstract: Integrated compose index (*ICI*) model, $ICI = \ln(\sum B \times \sum IV \times CAV)$, was first put forward to and used in this study. Twenty nine plots were selected in original broadleaved and Korean pine mixed forest in Changbai Mountain, Northeast China, to investigate the structure and biomass of various disturbed conifer-hardwood mixed selective cutting forests, secondary birch forests and larch plantation forests. Original broadleaved and Korean pine was viewed as a healthy benchmark. The health states and developing trends of various disturbed ecosystems were quantitatively assessed by *ICI*. The results indicates that *ICI* is a new practical and easily operational assessment method on forest ecosystem health. The vertical structure of stand was divided into four layers by tree height. They are upper overstory ($H \geq 18\text{m}$), subdominant overstory ($18 > H \geq$

基金项目:国家杰出青年科学基金资助项目(70325002); 国家重点基础研究发展计划(973 计划)资助项目(2003CB415104); 国家自然科学基金资助项目(NSFC70373044)。

收稿日期:2004-09-27; **修订日期:**2005-04-23

作者简介:陈高(1977~), 男, 湖北天门人, 博士, 主要从事生态系统学、森林管理、森林生态系统健康评价研究。E-mail: chengao@vip.sina.com

* 通讯作者 Author for correspondence.

Foundation item: The Excellent Young Scientist Fund of China (70325002); The National Key Project for Basic Research of P. R. China (No. 2003CB415104); The National Natural Science Foundation of China (NSFC70373044)

Received date: 2004-09-27; **Accepted date:** 2005-04-23

Biography: CHEN Gao, Ph. D., mainly engaged in ecosystem ecology, forest management, forest ecosystem health assessment.

10m), succession-layer ($10\text{m} > H \geq 2.5\text{m}$) and regeneration-layer ($H < 2.5\text{m}$). The *ICI* values of each layer were calculated and analyzed to express the relationship between disturbance, succession and health. Twenty nine plots were divided into 8 categories; *ICI* distance values of 6 disturbed types were calculated. Compared with the original broadleaved and Korean pine mixed forest, the healthy standard forest type (at 12.77), distance values of each disturbed type were as following: structure switched stand (at 0.64) < structure destroyed stand (at 0.75) < structure reserved stand (at 0.85) < heavy destroyed stand (at 1.95) < birch stand (at 2.07) < larch plantation (at 2.89). The stronger stress on ecosystem, the bigger distance value, the lower degree of ecosystem health is. The *ICI* of overstory layer (i. e. upper canopy overstory and subdominant overstory) can express structure condition and succession stage of community, and *ICI* of understory layer (i. e. of succession-layer and regeneration-layer) can suggest resilience to healthy ecosystem, the higher *ICI* value, the bigger resilience is. Hence, the intensity and sequent of various disturbances could be explained by *ICI*. The difference distance (*D*) between overstory layer and understory layer of the healthy standard type (Original broadleaved and Korean pine mixed forest) ranged from 0.28 to 0.35. This result suggested community structure was symmetrical and steady. Overstory layer was composed of *Pinus koraiensis*, *Tilia amurensis*, *Abies nephrolepis*, *Acer mono* and so on, which had high climax adaptation value and could remain its dominant status. The understory layer was composed of species with medium climax adaptation value, and some other species with low climax adaptation value. If $0 < D < 0.28$, it suggests this stand is still conifer-hardwood mixed forest, but conifer species (most *Pinus koraiensis*) in overstory layer were removed, the ratio between conifer and broadleaved decreased greatly; the other explanation is that community is disturbed, making understory active and many korean pine show up. If $D > 0.35$, this result suggested that the main dominant hardwood species in overstory layer (upper canopy overstory and subdominant overstory) had suffered heavy disturbance, maybe regeneration of korean pine was difficult in understory layer or it has not started yet. If $D \leq 0$, it shows a great heavy destroy happened, such as, over 70% biomass had been taken away, secondary birch forest or larch plantation in a naked slash. The bigger *D*, the easier invasion of Korean pine into community and well regeneration, the better the restoration capability and trend is.

Key words: ecosystem health; integrated compose index; broad-leaved and Korean pine mixed forest; disturbance

生态系统健康评估是 21 世纪生态系统健康学研究的主要内容和迫切任务之一,其评估理念和技术手段是推动生态系统健康(学)研究的重要因素和内在要求^[1~3]。大量学者对生态系统健康的概念^[4]、评估方法^[5~8]和思想^[9~11]进行了探讨。森林生态系统健康与人类干扰(砍伐、采种、土地开发等)活动有着必然联系,从生态系统自身属性看,可从组织、恢复力及活力等方面来刻画森林生态系统的健康,尤其是定量化的综合刻画^[1,12]。文章通过深入探讨东北长白山地区典型的阔叶红松林生态系统的干扰特征,利用表达森林群落结构的构成指数,提出综合构成指数的公式来刻画不同人类干扰下森林生态系统的健康,达到量化评估森林生态系统健康的目的。

1 研究地区概况

研究地点位于长白山北坡的长白山自然保护区东北端及其邻近的白河林业局红石林场内。长白山位于中国吉林省东南部与朝鲜交界处($41^{\circ}31' \sim 42^{\circ}28' \text{N}$, $127^{\circ}9' \sim 128^{\circ}55' \text{E}$),靠近欧亚大陆的最东端,濒临太平洋西岸。长白山属于温带大陆季风气候区,具有显著的中纬度山地气候特征。长白山区典型的地带性植被是以红松和一些珍贵的阔叶树组成的天然阔叶红松林,是世界上已为数不多的大面积原生针阔混交林,其结构复杂、组成独特、生物多样性丰富,是重要的木材资源、基因资源和环境资源^[13,14]。由于特殊的历史和社会原因,长白山自然保护区外的周围林业管理区域,天然阔叶红松林遭到长期的林业采伐、火灾、农地开发、拓荒、采集松子、猎取动物和药材等资源的各种形式干扰,尤其高强度林业采伐使天然阔叶红松林资源逐年锐减,原始阔叶红松林几乎荡然无存,仅几个自然保护区和高山陡坡等偏远地区才能见到,取而代之为大量的次生林和人工林,它们的结构组成发生巨大变化,生态服务功能也显著降低^[15,16]。长白山地区的阔叶红松林生态系统健康受到严重地破坏,是目前区域生态恢复和林业可持续发展必须极度关注的问题^[17,18]。

2 研究方法

2.1 调查取样

调查工作于 2001 年 8 月开展,样地海拔分布为 660~870m,属长白山典型的阔叶红松林分布区。调查共选取未受砍伐干扰仍保持原始状态的阔叶红松林类型 5 块,原始阔叶类型 2 块,天然针阔混交林但于 1990~2000 年间经不同砍伐模式的各种受干扰林分 12 块,皆伐或火烧迹地演替的次生白桦林 7 块,皆伐迹地人工营造落叶松林 3 块等一共 29 块样地,每个样地设置 $20\text{m} \times 30\text{m}$ 样方 2 个。每一样方又分为 6 个 $10\text{m} \times 10\text{m}$ 的小样方。调查内容包括:

(1) 29 个样地的基本状况,如经纬度、海拔、坡度、坡向、林分郁闭度、灌草总盖度等。

(2) 植被调查以小样方为单位,对所有乔木进行每木检尺(包括树苗和小树),记载树种、树高和生长状况(腐倒木、枯立或正常);对高度 $>1.3\text{m}$ 的乔木还记录其胸径,优势树木进行年轮取样。

(3) 在每个 $20\text{m}\times 30\text{m}$ 的样方四角设置 $5\text{m}\times 5\text{m}$ 小样方 4 个,对树高 $<2.5\text{m}$ 的乔木小树和幼苗进行生物量实测取样,样品在 68°C 恒温下烘干衡量后称重。

2.2 计算方法

计算方法采用本文在此首次提出的综合构成指数(Integrated Compose Index, ICI)模型 $ICI=\ln(\Sigma B\times \Sigma IV\times CAV)$,其来自于改进后的构成指数(Compose Index, CI)。构成指数最早由 Curtis 和 McIntosh 提出^[19],用于对处于不同时空的群落进行演替状态排序,可定量确定和描述群落的演替状态。其原理是利用分层(如上部林冠层和下部演替层)重要值(Important value, IV)及顶极适应值(Climax Adaptation Value, CAV)相乘,即 $CI=\Sigma IV\times CAV$,求得群落不同层次的构成指数。按群落的 CI 值从小到大排序,作为森林演替序列群落,同时可以将各类型按照现实阶段(主林层和亚主林层平均)及未来发展潜力(演替层和更新层平均)对各群落进行单轴排序,并作定量描述^[13]。

利用构成指数对群落结构和演替状态描述的优势,为综合体现森林生态系统健康的组织结构、恢复力和活力等健康参数指标,获得一个易操作的实用评估方法,本文通过引入生物量因子改进构成指数,提出综合构成指数模型 $ICI=\ln(\Sigma B\times \Sigma IV\times CAV)$ 或 $ICI=\ln(\Sigma IV\times CAV\times B)$,并用于定量刻画干扰、演替和森林生态系统健康的关系。公式中 B 表示生物量,取自然对数 $\ln$ 主要是为降低数量级。本文依垂直结构将群落分为 4 层,分别是主林层($H\geq 18\text{m}$)、亚主林层($18\text{m}>H\geq 10\text{m}$)、演替层($10\text{m}>H\geq 2.5\text{m}$)和更新层($H<2.5\text{m}$)。本文中所指上层即上两层(主林层和亚主林层),下层即下两层(演替层和更新层)。

3 结果与分析

3.1 29 个样地的群落概况及分类

研究首先通过干扰模式(不同方式和强度)分析对调查的 29 个样地进行特征分类,作为下一步健康评估的依据。群落聚类分析(图 1)通过 PC-ORD4.0 软件实现^[20],具体以胸径 $\geq 0.08\text{m}$ 的乔木种重要值^[21]为基础,对 29 个样地进行系统聚类,距离采用欧氏距离系数(即 Euclidean Distance 也叫 Pythagorean Distance),对距离系数的聚合方法采用组平均法(Group averaging)又称作平均连接法(Average Linkage clustering)进行聚类分析;同时参考群落特征分析和年轮取样。共将 29 块样地分为 8 类(表 1)。

原始阔叶红松林类型样地 1~5 是以红松和紫椴成分为主的针阔混交类型,属典型的长白山阔叶红松林类型。其主林层和亚主林层都占 3 层以上^[22],样地 3 和 4 有一定的臭松成分。样地 5 和 7 是二道江江边的护岸林,生境为低洼的河滩湿地,根据年轮取样和资料判定该林分有 200 多年历史。但演替层($H\geq 2.5\text{m}$)以上一直没有出现红松,林分主要由阔叶树组成。样地 6 位于石头多、地势低、易积水处。样地 6 与 7 和样地 1~5 在树种结构组成上存在一定差异,它们红松成分很少,甚至没有,但它们都是天然原始群落类型,没受到人为干扰,将它们归为原始阔叶类,这表示阔叶红松林生态系统分布区生境结构的复杂性。

样地(8、9 至 19)原来都是原始针阔混交林,但在 1990 年至 2000 年间经历过一次或者两次强度为 $20\%\sim 50\%$ 不等的林业砍伐干扰。林业生产对红松、紫椴、水曲柳等建群树种的选择性砍伐或保留,造成多种情况出现。经过结构组成分析和聚类分析,可将这 12 块样地归纳为如下 4 种类型:①样地 8、9、10 和 11 基本保持原有阔叶红松林的针阔混交和混交比例相似的结构特征,仅具体的红松和其它阔叶树种的比例有所起伏,称之为结构保留类型;②林业砍伐大量取走椴树、水曲柳等阔叶建群种,使得针叶树种红松比例很高的样地(12)或臭松很高的样地 13、14 和 15,称之为结构转换类型;③林业砍伐主要取走红松,致使红松比例明显下降,阔叶类树种占优的样地 16 和 17,称之为结构破坏类型;因为一定的针阔混交比例是该区千百年来自然选择形成的顶级群落类型,是最稳定和具有最高生态服务功能的生态系统的基础,也是目前众多生态恢复的目标^[13,22]。④是样地 18 和 19,虽然砍伐造成的群落结构组成和结构保留类型相似,但多次 $40\%\sim 50\%$ 的高强度砍伐造成主林层消失,称之为严重干扰类型,其地上部分生物量严重降低(表 4)。这 4 种类型的划分基于林业生产对优势树种红松、椴树和水曲柳等的定向选择,不同

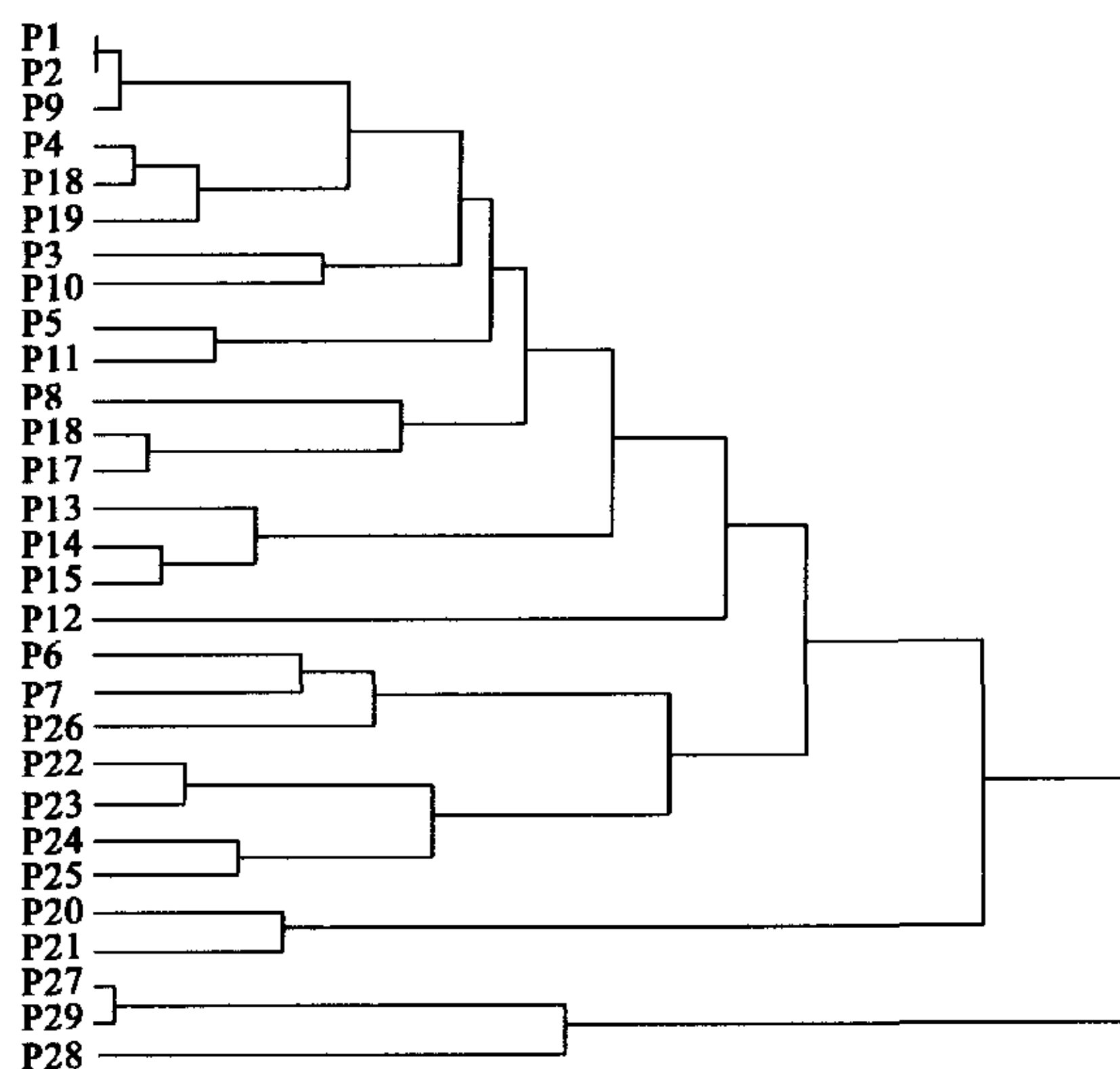


图 1 29 块样地的聚类分析图

Fig. 1 Clustering analysis chart of 29 plots

砍伐方式造成群落不同的结构组成,对系统今后的恢复速率和生态质量产生决定性影响。在向健康的原始类型方向的恢复过程中,结构合理的群落能保留更多的健康特征,如群落的小生境特征、其它赖以生存的生物种群等。这样与原始类型就更加接近,恢复力高。

表 1 29 个样地的基本概况
Table 1 Stand characteristics of the 29 sampled plots

样地 Plot	海拔 Elevation	经纬度 Longitude & altitude	类别 Category	干扰特征 Disturbance characteristics
1	745	128°05'47.9" 42°24'06.4"	原始阔叶红松林 ^①	原始老龄林,无干扰 Original old-growth forest, no disturbances
2	745	128°05'47.9" 42°24'06.4"		
3	765	128°29'48.4" 42°23'54.1"		
4	765	128°25'55.4" 42°22'07.5"		
5	690	128°25'55.4" 42°22'07.5"		
6	843	128°03'35.8" 42°18'33.4"	原始阔叶林 ^②	原始老龄林,生境低湿 Original old-growth forest, be in wet lowland
7	660	128°25'43.7" 42°22'12.4"		
8	840	128°20'17.9" 42°20'15.8"	结构保留类型 ^③	1990~2000 年,经历一次或两次的择伐干扰 Once or twice selective cutting in 1990~2000
9	685	128°28'37.9" 42°22'39.1"		
10	740	128°27'02.8" 42°21'54.6"		
11	735	128°29'46.9" 42°21'02.9"	结构转化类型 ^④	同上, The same above
12	870	128°20'11.2" 42°20'37.9"		
13	735	128°30'01.1" 42°20'54.3"		
14	790	128°31'02.4" 42°23'05.1"		
15	705	128°29'22.6" 42°22'15.3"	结构破坏类型 ^⑤	同上, The same above
16	685	128°28'37.9" 42°22'39.1"		
17	730	128°29'23.6" 42°21'12.6"	严重干扰类型 ^⑥	同上, The same above
18	730	128°30'22.4" 42°21'01.0"		
19	735	128°29'44.5" 42°21'13.1"	次生白桦林 ^⑦	60-year-old
20	750	128°05'56.0" 42°24'08.0"		60-year-old
21	758	128°05'58.1" 42°24'07.2"		60-year-old
22	840	128°03'33.4" 42°18'32.4"		80-year-old
23	758	128°05'37.2" 42°21'20.5"		50-year-old
24	764	128°05'36.9" 42°21'20.0"		50-year-old
25	760	128°06'13.6" 42°21'32.0"		30-year-old
26	760	128°06'13.3" 42°21'44.0"	人工落叶松林 ^⑧	30-year-old
27	725	128°29'24.5" 42°12'16.0"		10-year-old
28	733	128°30'49.6" 42°16'37.3"		15-year-old
29	675	128°29'58.9" 42°20'49.7"		20-year-old

①Original broad-leaved and Korean pine mixed forests, ②Original broad-leaved forests, ③Structure reserved forests, ④Structure switched forests, ⑤Structure destroyed forests, ⑥Heavy disturbed forests, ⑦Secondary birch forests, ⑧Larch plantations

样地 20、21 至 26 都属于次生白桦-山杨林系列,其中样地 20、21 和 22 的主林层白桦、山杨比重超过 60%,样地 23 和 24 约占 50%,25 和 26 相对较少,样地 26 的白桦还没有进入主林层。其它阔叶成分发展迅速。据树木年轮取样和资料确认样地 20 和 21,及样地 23 和 24 分别是在 20 世纪的 40 年代和 50 年代左右经过火干扰后形成的,样地 22 是 1920 年左右,样地 25 和 26 是 1970 年左右修建道路人为砍伐干扰后的迹地更新产生的。可能砍伐迹地保留了阔叶树种的幼苗和幼树,在相对于火灾迹地的更新和发展方面,样地 22 和 25、26 在结构组成上更加接近原始类型,自然恢复的较火灾干扰后演替的样地 20、21 和样地 23 和 24 要快。这在时间序列上给研究提供了一种比较的实例。

最后 3 块样地 27、28 和 29 分别是在 1990 年、1985 年 12 月和 1979 年的皆伐迹地上,人工营造的落叶松林,主林层和亚主林层主要由落叶松占据,但混有一定数量的演替先锋树种,如白桦、枫桦、柳、山杨等。同时演替层和更新层出现大量黄菠萝、水曲柳、椴树、各种槭树和榆类等阔叶树种,至少量的红松,表现出良好的恢复和向原生类型靠近的发展趋势。主要原因是周围存在原生阔叶红松林群落,能提供良好种源。作为地带性顶极的阔叶红松林具有很高弹性(自我恢复)或稳定性的一种表现。

本文一共将 29 个样地分为 8 个类别(表 1)。

3.2 树种 CAV 值

确定群落 CI 值的关键是确定各乔木树种的 CAV 值^[13]。根据某一乔木树种在群落中的枯立木株数、优势树种达到自然成熟的年龄大小、阔叶红松林内的伴生状况、优势树种耐荫性、先锋性及稳定性等多个因子综合判定,由专家系统评分。红松由于其在阔叶红松林生态系统中特殊地位,取值为 10,并以之为标准,确定其它物种的 CAV 值,取值范围为 1~10(表 2)。

3.3 构成指数(CI)

根据实测数据求出各分层(主林层、亚主林层、演替层和更新层)重要值(IV)^①,再利用公式 $CI = \sum IV \times CAV$, 计算出 29 块样地的各分层构成指数(表 3)。分层构成指数可刻画群落垂直结构的状况,上层指数表示群落目前的结构状况和演替阶段,下层表达了恢复和演替的趋势。一定程度上能揭示干扰的强度及造成的破坏程度。如样地 18 和 19,虽然从胸径 ≥ 0.08 m 的乔木群落结构组成来看,群落构成成分和原始阔叶红松林相似,但砍伐干扰主要针对群落的主林层,导致群落主林层乔木全部取走,因此这种干扰是强度干扰的一种表现。这种情况通过分层的构成指数计算能很好地说明。

表 2 长白山阔叶红松林生态系统乔木树种的顶极适应值(CAV)

Table 2 Competitive adaptation value(CAV) of arbor species in broad-leaved and Korean pine mixed forest in Changbai Mount							
树种*	顶极适应值	树种	顶极适应值	树种	顶极适应值	树种	顶极适应值
Tree species	CAV	Tree species	CAV	Tree species	CAV	Tree species	CAV
红松	10.0	紫椴	4.5	花曲柳	2.4	白桦	1.2
臭松	6.6	假色槭	4.3	水曲柳	2.4	青杨	1.2
色木槭	5.2	春榆	3.8	胡桃楸	2.2	秋子梨	1.2
白牛槭	5.0	枫桦	3.8	花楸	2.0	山定子	1.2
青楷槭	5.0	花楷槭	3.8	黄菠萝	2.0	山杨	1.2
沙松	5.0	裂叶榆	3.8	黄榆	2.0	香杨	1.2
长白鱼鳞松	4.7	千金榆	3.8	水榆	2.0	大黄柳	1.0
红皮云杉	4.7	栓皮榆	3.8	暴马丁香	1.5	蒿柳	1.0
怀槐	4.5	蒙古栎	3.0	长白落叶松	1.5		
糠椴	4.5	扭筋槭	3.0	稠李	1.5		

* 红松 *Pinus Koraiensis*,臭松 *Abies nephrolepis*,沙松 *A. holophylla*,长白落叶松 *Larix olgensis*,红皮云杉 *Picea. Koraiensis*,长白鱼鳞云杉 *Picea jezoensis* var. *komarovii*,胡桃楸 *Juglans mandshurica*,山杨 *Populus davidiana*,香杨 *P. koreana*,青杨 *P. ussuriensis*,大黄柳 *Salix raddeana*,蒿柳 *S. viminalis*,枫桦 *Betula costata*,白桦 *B. platyphylla*,千金榆 *Carpinus cordata*,蒙古栎 *Quercus mongolica*,春榆 *Ulmus japonica*,裂叶榆 *U. laciniata*,黄榆 *U. macrocarpa*,栓枝春榆 *U. japonica* var. *suberosa*,怀槐 *Maackia amurensis*,黄菠萝 *Phellodendron amurense*,白牛槭 *Acer mandshuricum*,色木槭 *A. mono*,假色槭 *A. pseudo-sieboldianum*,扭筋槭 *A. triflorum*,青楷槭 *A. tegmentosum*,花楷槭 *A. ukurunduense*,紫椴 *Tilia amurensis*,糠椴 *T. mandshurica*,水曲柳 *Fraxinus mandshurica*,花曲柳 *F. rhynchophylla*,暴马丁香 *Syringa reticulata* var. *mandshurica*,水榆 *Sorbus alnifolia*,花楸 *S. pohuashanensis*,稠李 *Prunus padus*,山定子 *Malus baccata*,秋子梨 *Pyrus ussuriensis*

将构成指数简单地引入作为森林生态系统健康评估的方法,还不恰当,结构数据可以反映群落目前的演替阶段和结构的空间配置情况。但对于干扰强度和演替趋势的刻画及定量表达受干扰系统的健康程度还是不够的。构成指数仅偏重于反映结构参数还和分层水平有关,同时构成指数将红松的地位提高到很高($CAV=10$),如果干扰导致群落中红松的比例显著提高,分层构成指数(主林层)就会出现比原始健康类型要高的情况,如样地 12、14 等(表 3)。因此,这种偏离对于直接简单引用结构构成指数来说明干扰导致的对阔叶红松林生态系统健康的影响,不十分恰当。人为选择性砍伐干扰造成的群落残破特征具有一定的复杂性,因此,除直接用结构数据表示干扰对结构的破坏程度外,还需增加这种干扰对群落质量破坏程度的揭示,即反映群落蓄积和生物总量的破坏程度。通过改进构成指数提出综合构成指数的模型① $ICI = \ln(\sum B \times \sum IV \times CAV)$ 或 ② $ICI = \ln(\sum IV \times CAV \times B)$ 来解决这个问题。模型中 B 表示蓄积量或生物量,可用总蓄积量或生物量进行综合简单的评价,如公式①,也可分别计算最后求和如公式②。本文利用公式①和各样地的乔木地上部分总生物量计算群落的综合构成指数。

3.4 综合构成指数(ICI)

各样地生物量除更新层利用实测取样获得外,其它 3 层都采用通用的生物量模型 $B = a \times (D^2H)^b$ 获得。 D 表示树高 1.3m 处的胸径, H 表示树高, a 和 b 都是待定参数,取值通过调查样地的模拟和相关的研究^[23,24]。其中需要说明的是样地 28 和 29,都是人工落叶松林,营造模式和方法一样。样地 29 是 20a 的,样地 28 才是 15a 左右的,但后者的乔木地上部分生物量($70.1 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$)却比前者($48.3 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$)高许多(表 4)。主要原因是样地 29 在调查之前已经过人工的砍伐利用和疏林措施,致使生物量降低。

增加考虑群落现有生物量,对正确客观反映群落受干扰的情况和群落目前所处的演替阶段中的状态很有帮助。综合构成指数考虑的不仅是结构组成相似性的问题,它将群落质量和结构综合考虑。利用公式 $ICI = \ln(\sum B \times \sum IV \times CAV)$ 可以获得 29 个不同干扰类型下的阔叶红松林分层的构成指数,如表 5 所示。

在本研究中,原始未受到人类砍伐等干扰的阔叶红松林被作为健康的生态系统基准类型。将上下两层的综合构成指数差值定义为 D ,研究表明:原始健康类型的综合构成指数比较稳定,一般下两层和上两层之间能保持 0.28~0.35 个距离点(表 5),说明群落结构相对均匀和稳定。上层由红松、椴树、臭松、色木槭等大适应值的树种占据并保持优势,演替层和更新层由顶极适应

① 陈高. 2003. 长白山阔叶红松林生态系统健康评估理论与实践(博士学位论文). 沈阳:中国科学院沈阳应用生态研究所

值中间的各种槭树类和适应值小的其它树种组成。样地 4 的 D 只有 0.15,经分析,正符合综合构成指数对干扰状况的反映。样地 4 离道路不远,可能受到过一定规模的干扰,致使白桦等先锋树种在该样地出现。其中出现的最大白桦胸径达 29.90cm,高度 15m,处于亚主林层。根据对白桦样地的实测,胸径达到 29.90cm 左右的白桦,一般年龄在 70 年左右,高度 20~24m。样地 4 中的白桦在原始林内生长,高生长受到压制。这些说明该样地约在 70 年前受到过一定规模的林冠强度干扰,但干扰没有改变林分的主体组成结构和特征,属自然干扰(如风倒等)。这种干扰导致群落内演替层和更新层出现大量的红松幼树和幼苗,致使下两层(演替层和更新层)和上两层(主林层和亚主林层)的距离缩短。说明了原始类型的自我更新能力和调节的能力。同时表明 70 年来样地 4 正处于一个受到自然扰动后的自我‘回复’过程中。相对而言,样地 1、2 和 5 近百年来局部虽也有小尺度的林窗动态,总体上群落结构一直保持平稳。原始阔叶类型(样地 6 和 7)的两层指数平均值都低,并且比较接近,差值 *D* 只有 0.02。表明它们的上下层结构组成较一致(表 5)。

表 3 29 个样地的构成指数
Table 3 Compose index(CI)of original old-growth and various secondary disturbed forests in Changbai Mount.

类别 Categories	样地 Plot	上两层的构成指数 CI of two overstory layer			下两层的构成指数 CI of two understory layer		
		主林冠层 Upper canopy overstory	亚主林层 Subdominant overstory	平均值 Mean value	演替层 Succession layer	更新层 Regeneration layer	平均值 Mean value
原始阔叶红松林 ^①	1	1892.19	1864.80	1878.50	1314.10	1345.43	1329.77
	2	1885.58	1877.43	1881.51	1278.27	1381.09	1329.68
	3	2198.55	1262.70	1730.63	1379.45	1240.68	1310.07
	4	2000.90	1406.09	1703.50	1343.87	1580.89	1462.38
	5	1830.74	1499.49	1665.12	1166.12	1348.54	1257.33
	平均值	1961.59	1582.10	1771.85	1296.36	1379.33	1337.85
原始阔叶林 ^②	6	1288.02	1333.94	1310.98	1131.26	1047.95	1089.61
	7	991.49	1105.92	1048.71	819.81	1190.61	1005.21
	平均值	1139.76	1219.93	1179.85	975.54	1119.28	1047.41
结构保留类型 ^③	8	1883.07	1451.96	1667.52	1298.04	1394.56	1346.30
	9	1986.01	1589.09	1787.55	1138.89	962.70	1050.80
	10	1847.27	1134.08	1490.68	1345.13	955.01	1150.07
	11	2382.64	1625.15	2003.90	1517.20	951.09	1234.15
	平均值	2024.75	1450.07	1737.41	1324.82	1065.84	1195.33
结构转化类型 ^④	12	2177.75	2076.70	2127.23	1116.60	1130.21	1123.41
	13	1397.74	2010.89	1704.32	1569.69	1108.27	1338.98
	14	2021.91	1598.32	1810.12	1587.72	1419.88	1503.80
	15	1515.49	1544.27	1529.88	1196.94	1110.60	1153.77
	平均值	1778.22	1807.55	1792.89	1367.74	1192.24	1279.99
结构破坏类型 ^⑤	16	1496.87	1175.23	1336.05	1227.38	1276.48	1251.93
	17	1221.03	1723.81	1472.42	1342.73	1095.05	1218.89
	平均值	1358.95	1449.52	1404.24	1285.06	1185.77	1235.41
严重干扰类型 ^⑥	18	0.00	1623.15	811.58	1403.88	1123.69	1263.79
	19	0.00	1832.94	916.47	1373.11	1356.18	1364.65
	平均值	0.00	1728.05	864.035	1388.50	1239.95	1314.22
次生白桦林 ^⑦	20	425.02	579.41	502.22	1064.36	1598.22	1331.29
	21	360.00	360.00	360.00	1300.03	1711.38	1505.71
	22	461.76	623.07	542.42	889.01	910.76	899.89
	23	417.39	705.17	561.28	1329.92	1532.88	1431.40
	24	413.20	754.31	583.76	1248.34	1943.28	1595.81
	25	432.42	748.49	590.46	961.66	781.35	871.51
	26	720.00	763.09	741.55	1116.68	860.40	988.54
	平均值	461.40	647.65	554.53	1130.00	1334.04	1232.02
人工落叶松林 ^⑧	27	0.00	535.96	267.98	469.12	741.14	605.13
	28	300.00	578.22	439.11	506.19	1126.45	816.32
	29	546.19	475.19	510.69	796.81	1105.21	951.01
	平均值	282.06	529.79	405.93	590.71	990.93	790.82

①~⑧同表 1 the same as table 1

表 4 29 个样地的乔木地上部分生物量(t · hm⁻²)

Table 4 Aboveground biomass of arbor in 29 plots

样地 Plot	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
乔木生物量 Free biomass	211.0	191.8	176.3	231.2	188.6	126.7	149.5	95.7	65.9	106.9	85.7	103.9	75.3	109.1	137.7
样地 Plot	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	
乔木生物量 Free biomass	110.7	125.9	52.1	64.6	119.9	117.8	114.4	81.3	100.0	46.2	38.2	36.8	70.1	48.3	

表 5 29 个样地的综合构成指数及与健康基准的距离比较

Table 5 ICI and difference between overstory layer and understory layer of 29 plots

类别 Categories	样地 Plot	综合构成指数 ICI			与健康基准的距离	
		上两层 ^⑨	下两层 ^⑩	上下两层差值 Difference	上两层 ^⑨	下两层 ^⑩
原始阔叶红松林 ^①	1	12.89	12.54	0.35		
	2	12.80	12.45	0.35		
	3	12.63	12.35	0.28		
	4	12.88	12.73	0.15		
	5	12.66	12.38	0.28		
	平均值	12.77	12.49	0.28	0.00	0.00
原始阔叶林 ^②	6	12.02	11.84	0.18		
	7	11.96	11.92	0.04		
	平均值	11.90	11.88	0.02	0.87	0.61
结构保留类型 ^③	8	11.98	11.77	0.21		
	9	11.68	11.15	0.53		
	10	11.98	11.72	0.26		
	11	12.05	11.57	0.48		
	平均值	11.92	11.55	0.37	0.85	0.94
	12	12.31	11.67	0.64		
结构转化类型 ^④	13	11.76	11.52	0.24		
	14	12.19	12.01	0.19		
	15	12.26	11.98	0.28		
	平均值	12.13	11.80	0.33	0.64	0.69
	16	11.90	11.84	0.07		
	17	12.13	11.94	0.19		
结构破坏类型 ^⑤	平均值	12.02	11.89	0.13	0.75	0.60
	18	10.65	11.10	-0.44		
	19	10.99	11.39	-0.40		
严重干扰类型 ^⑥	平均值	10.82	11.25	-0.43	1.95	1.24
	20	11.01	11.98	-0.97		
	21	10.66	12.09	-1.43		
	22	11.04	11.54	-0.51		
	23	10.73	11.66	-0.94		
	24	10.97	11.98	-1.01		
次生白桦林 ^⑦	25	10.21	10.60	-0.39		
	26	10.25	10.54	-0.29		
	平均值	10.70	11.48	-0.78	2.07	1.01
	27	9.20	10.01	-0.81		
	28	10.33	10.95	-0.62		
	29	10.11	10.74	-0.62		
人工落叶松林 ^⑧	平均值	9.88	10.57	-0.69	2.89	1.92

①original broad-leaved and Korean pine mixed forests, ②original broad-leaved forests, ③structure reserved forests, ④structure switched forests, ⑤structure destroyed forests, ⑥heavy disturbed forests, ⑦secondary birch forests, ⑧larch plantations, ⑨two overstory layer, ⑩two understory layer

上图中的样地排列顺序按照原始健康基准的阔叶红松林(1,4,2,5 和 3)—原始阔叶类型(6 和 7)—受中轻度干扰的结构保留型(11,8,10 和 9)—结构转换型(12,15,14 和 13)—结构破坏型(17 和 16)—受重度干扰类型(19 和 18)—次生白桦林系列(22,20,24,23,21,26 和 25)—人工落叶松系列(28,29 和 27)排列的。

对于择伐干扰产生的各样地(8、9、10~19),出现了一个明显的交叉点和分界点(图 2)。在类别 6 (严重干扰类型样地 18 和 19)左边的其它几种结构干扰类型,依然保持上层比下层指数要高, $D>0$,说明上层顶极指数高的红松和/或臭松等占优。到类别 6 及右边样地, $D<0$,上层指数值比下层低,且都比前面的各类型样地低很多。说明它们受到的干扰强度很高,并且现在的群

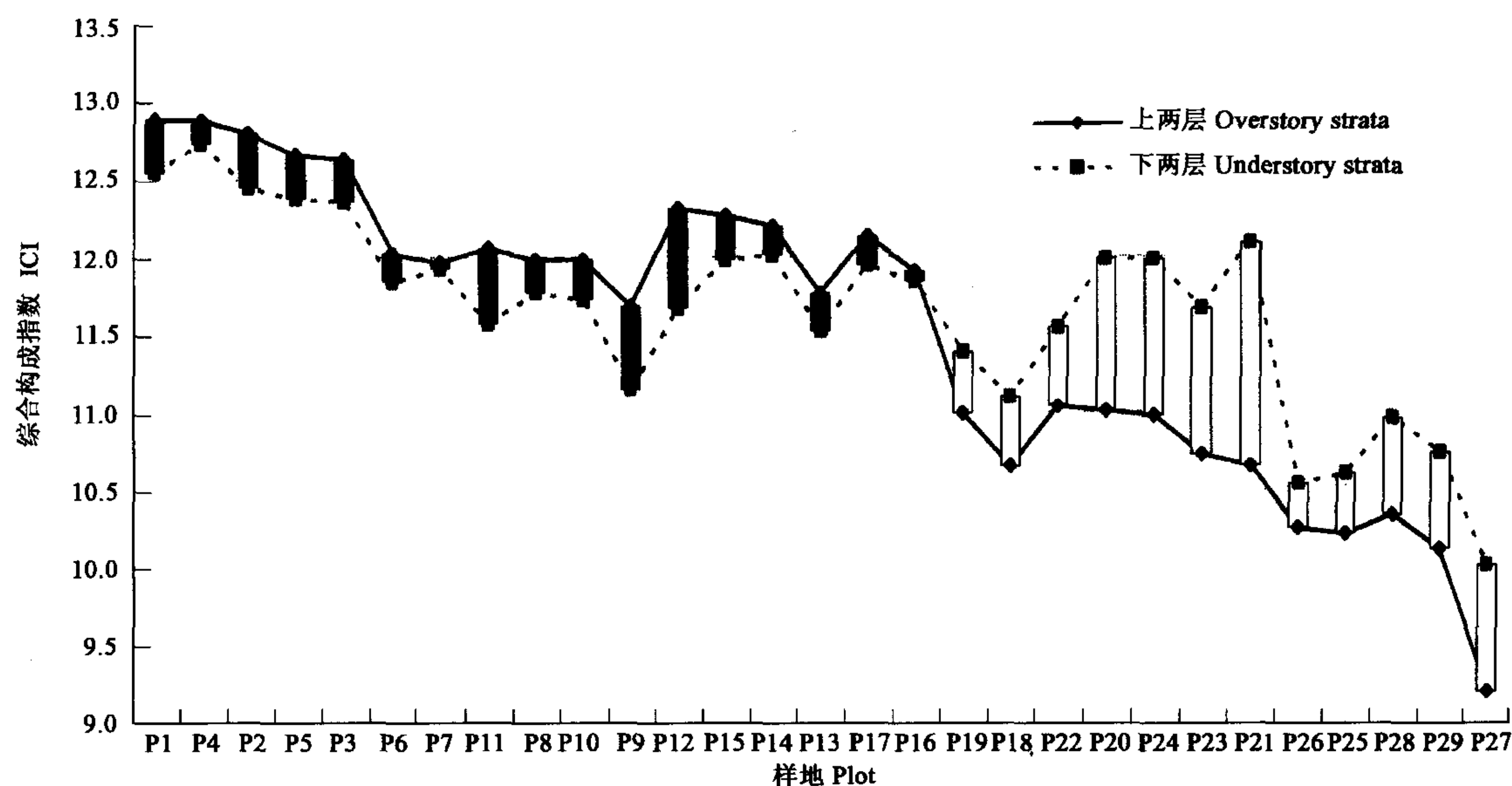


图2 综合构成指数表示的健康距离趋势图

Fig. 2 Structure state and health difference of 29 plots expressed by integrated compose index

黑柱表示上下两层差值为正值,白柱表示差值为负值 black pillar shows the ICI value of overstory higher than that of understory, and white pillar is reverse

落演替层和更新层极其活跃,出现顶极指数高的树种,群落处于积极向原始健康基准类型恢复过程中。次生白桦林系列(样地20~26)和人工落叶松系列(样地27、28和29)和类别6有同样的 D 值为负的现象,只是具体的每个群落差值大小不一样。差值 D 越大,说明群落的下层出现的红松等顶极指数高的树种越多,群落的恢复基础就越好。如样地21, D 值为-1.43,在一个20m×30m的样方中就出现红松更新苗和幼树266株,其中20~30a的8株,10~20a的105株,说明了群落的未来发展趋势很好。如果辅以合适的人工抚育措施,群落向顶级的针阔混交的阔叶红松林类型演替的速度就加快,健康恢复就快。

29块样地分为8个类型,2个原始状态未受干扰的类型,和6个受干扰类型。第一个类型原始阔叶红松林被作为健康的基准,通过与它比较可定量受损系统与健康基准的差距。对各受干扰群落依距离健康基准的远近排序:结构转换型 $0.64 <$ 结构破坏型 $0.75 <$ 结构保留型 $0.85 <$ 严重干扰类型 $1.95 <$ 白桦林系列 $2.07 <$ 人工落叶松系列 2.89 (表5)。同时综合构成指数的上层(主林层和亚主林层)指数将可表示群落目前的结构状况和健康水平,下层(演替层和更新层)指数表示群落潜在的发展水平和恢复能力。

4 结论与讨论

综合构成指数吸收了构成指数对群落结构现状和演替阶段排序的优点,同时因为吸收生物量因子,更加综合了对干扰的解释。利用分层[主林层($H \geq 18\text{m}$)、亚主林层($18\text{m} > H \geq 10\text{m}$)、演替层($10\text{m} > H \geq 2.5\text{m}$)和更新层($H < 2.5\text{m}$)]的综合构成指数值可定量不同干扰模式造成的受损系统与原始健康基准之间的健康差距。健康基准是12.77,与之差距越大,群落受干扰破坏越大,系统健康程度越低。29块样地分为8个类型,6个受干扰类型依距离原始健康基准的远近排序为:结构转换型 $0.64 <$ 结构破坏型 $0.75 <$ 结构保留型 $0.85 <$ 严重干扰类型 $1.95 <$ 白桦林系列 $2.07 <$ 人工落叶松系列 2.89 。

综合构成指数的上层(主林层和亚主林层)指数能表示群落结构现状和目前处于演替阶段的位置;下层(演替层和更新层)指数能表示群落向健康基准类型恢复的潜力,值越大,潜力越大。上下两层综合能说明群落受到干扰的强度和后果。对于阔叶红松林生态系统来说,原始健康基准类型上层指数位于12.77,下层位于12.49,上下两层差值 D 位于0.28~0.35之间。如 $0 < D < 0.28$ 说明目前群落结构还是针阔混交类型,但群落上层的针叶树(主要是红松)比例明显减少;或者群落受干扰,下层结构活跃,红松更新现象明显。 $D > 0.35$ 说明群落主林层和亚主林层的阔叶树种受到干扰破坏,或者在演替更新层红松很难更新或还没有开始大量更新。 $D \leq 0$ 说明群落遭受很大强度的干扰,如70%以上的生物存量被破坏取走,或直接导致裸地重新发育演替的白桦林、营造人工落叶松林等情况。差值 D 越大,红松的侵入程度越高,红松更新状况良好,该群落向顶级恢复的趋势良好。

本文通过选择目前长白山阔叶红松林生态系统区的各种主要类型系统,利用综合构成指数比较好地说明了不同干扰模式对阔叶红松林生态系统健康的影响,表明综合构成指数是一种易操作的森林生态系统健康定量评估方法。研究结果将对区域林业可持续发展和生态恢复提供一定的参考和指导。

References:

- [1] Costanza R. Toward an operational definition of ecosystem health. *Ecosystem Health: New Goals for Environmental Management*. Washington, D. C: Island Press, 1992. 239~256.
- [2] Rapport D J, Costanza R, McMichael A J. Assessing ecosystem health. *Tree*, 1998, **13**: 397~402.
- [3] Steedman R J. Ecosystem health as a management goal. *Journal of the North American Benthological Society*, 1994, **13**(4): 605~610.
- [4] O'-Laughlin-J. Forest ecosystem health assessment issues: definition, measurement, and management implications. *Ecosystem Health*, 1996, **2**(1): 19~40.
- [5] Alexander S A, Palmer C J. Forest health monitoring in the United States: First four years. *Environment Monitoring Assessment*, 1999, **55**(2): 267~277.
- [6] Chen G, Deng H B, Wang Q L. Approaches for assessing forest ecosystem health. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2003, **14**(6): 995~999.
- [7] Hodges D G, Regens J L. Methodological issues in valuing forest ecosystem health. *Ecosystem Health*, 1996, **2**(1): 52~56.
- [8] Yazvenko S B, Rapport D J. A framework for assessing forest ecosystem health. *Ecosystem Health*, 1996, **2**(1): 40~52.
- [9] Callicott J B. Aldo Leopold and the foundations of ecosystem management. *Journal of Forestry*, 2000, **5**: 5~13.
- [10] Chen G, Dai L M, Fan Z H, et al. On forest ecosystem health and its evaluation. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2002, **13**(5): 605~610.
- [11] Kimmins J P. The health and integrity of forest ecosystems: Are they threatened by forestry? *Ecosystem Health*, 1996, **2**(1): 5~19.
- [12] Schaeffer D J, Henricks EE and Kerster H W. Ecosystem health 1. Measuring ecosystem health. *Environmental Management*, 1988, **12**: 445~455.
- [13] Chen D K. *Natural Forest - Structure, Function, Dynamics and Management*. Harbin: Northeast Forestry University Press, 1994.
- [14] Wang Y J. *Korean Pine and Broadleaved Mixed Forest*. Harbin: Northeast Forestry University Press, 1995. 110~112.
- [15] Dai L M, Shao G F, Chen G. Forest cutting and regeneration manner in Changbai Mountain. *Journal of Forestry Research*, 2003, **14**(1): 56~60.
- [16] Nakashizuka T, Iida S. Composition, dynamics and disturbance regime of temperate deciduous forests in Monsoon Asia. *Vegetatio*, 1995, **121**: 23~30.
- [17] Li C Z, Lofgren K G. A theory of red pine (*Pinus koraiensis*) management for both timber and commercial seeds. *Forest Science*, **46**(2): 284~290.
- [18] Li J W. *Korean Pine Mixed Forest: Ecology and Management*. Harbin: Northeast Forestry University Press, 1997. 107~121.
- [19] Curtis J T, McIntosh R P. An upland forest continuum in the prairie-forest border region of Wisconsin. *Ecology*, 1951, **32**: 476~496.
- [20] McCune B, Mefford M J. PC~ORD: Multivariate analysis of ecological data. Version 4.0 for Windows. MjM Software Design, 1999.
- [21] Chen G, Dai L M, Zhou L. Structure of stands and canopy characteristics of various disturbed communities of Korean pine and broadleaved mixed forest in Changbai Mountain. *Chinese Journal of Ecology*, **23**(5): 116~120.
- [22] Barnes B V, Xu Z B, Zhao S D. Forest ecosystems in an old-growth pine-mixed hardwood forest of the Changbai shan Preserve in northeastern China. *Canadian Journal of Forestry Research*, 1991, **22**: 144~160.
- [23] Ding B Y, Sun J H. Study on biomass of Korean pine plantation in east mountain areas of northeast China. *Bullet Botany of Research*, 1989, **9**(3): 149~157.
- [24] Li W H, Deng S M, Li F. Biomass Research of main ecosystems in Changbai Shan. *Research on Forest Ecosystem*, 1981, (I): 34~50.

参考文献:

- [6] 陈高, 邓红兵, 王庆礼. 森林生态系统健康评估的一般性途径探讨. *应用生态学报*, 2003, **14**(6): 905~999.
- [10] 陈高, 代力民, 范竹华. 森林生态系统健康及其评估监测. *应用生态学报*, 2002, **13**(5): 605~610.
- [13] 陈大珂著. 天然次生林-结构、功能、动态与经营. 哈尔滨: 东北林业大学出版社, 1994.
- [14] 王业遽著. 阔叶红松林. 哈尔滨: 东北林业大学出版社, 1995. 110~112.
- [18] 李景文主编. 红松混交林生态与经营. 哈尔滨: 东北林业大学出版社, 1997. 107~121.
- [21] 陈高, 代力民, 周莉. 受干扰长白山阔叶红松林林分组成及冠层结构特征. *生态学杂志*, 2004, **23**(5): 116~120.
- [23] 丁宝永, 孙继华. 东北东部山区红松人工林群落生物量的研究. *植物研究*, 1989, **9**(3): 149~157.
- [24] 李文华, 邓申枚, 李飞. 长白山主要生态系统生物量的研究. *森林生态系统研究*, 1981, (I): 34~50.