

完全封育方式对天然油松林的影响

侯 琳 ,雷瑞德*

(西北农林科技大学林学院,陕西 杨凌 712100)

摘要 基于敏感性分析,选择了 12 个反映封育天然油松林植被和土壤特征的指标,建立了封山育林措施实施效果的评价指标体系。根据等间距法,将封山育林措施实施效果综合指数划分为 5 个等级。采用层次分析法和综合指数法,对封山育林措施在不同封育年限天然次生油松林中的实施效果进行了评价,结果表明:封育 16、25、30、45、60a 和 75a 的天然次生油松林,封育措施实施效果综合指数值分别为 7.25、6.88、7.82、5.51、4.78 和 2.79。随着封育年限增加,完全封育方式实施效果逐渐变差,本区天然林完全封育年限最长不应超过 45a。封育 45a 后,应采取适宜树种混交、择伐等培育和经营措施。

关键词 黄龙山,天然次生油松林,封山育林,生态系统健康,评价

文章编号:1000-0933(2007)01-0288-08 中图分类号:Q142,S718.5 文献标识码:A

Assessment on effect of fully hillsides-closed and afforested mode on natural *Pinus tabulaeformis* forest

Hou Lin, Lei Ruide*

College of Forestry, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China

Acta Ecologica Sinica 2007, 27 (1): 288 ~ 295.

Abstract: Huanglong Mountain forest zone is one of the main natural secondary forest zones on the southern Loess Plateau in Shaanxi province. Since 1950, a mode of fully hillsides-closed and afforested (FHA) has been applied in the forest. In some special sites, the forest age even exceeds 80 years. *Pinus tabulaeformis* forest is the most important vegetation in warm temperate region in China. Similarly, population of *P. tabulaeformis* is dominant in the formed forest ecosystem. *Quercus liaotungensis*, *Syringa oblata*, *Populus davidiana*, *Prunus davidiana*, *Betula platyphylla* and *Toxicodendron vernicifluum* can be occasionally found in arbor layer and species of shrub are abundant. Based on the data collected from 31 plots and 93 soil samples, health of the forest ecosystem has been discussed and appropriate FHA age has been pointed out. 12 indexes manifesting traits of vegetation and soil in natural secondary *P. tabulaeformis* forest ecosystem were acquired by sensitive analysis and the assessment index system for FHA mode was established. According to equal distance method, 5 grades of integrated index for evaluating FHA mode were compartmentalized. Effect of FHA mode on natural secondary *P. tabulaeformis* forest was evaluated by methods of integrated index and analytic hierarchy process (AHP). The results are follows: values of integrated index in FHA 16, 25, 30, 45, 60a and 75a were 7.25, 6.88, 7.82, 5.51, 4.78 and 2.79 respectively. With the FHA age increase, the effect of FHA mode became worse. It could be concluded that natural forest

基金项目:西北农林科技大学青年基金资助项目(QN-2003-07)

收稿日期:2006-04-17;修订日期:2006-11-21

作者简介:侯琳(1969~),男,陕西武功人,博士生,副研究员,主要从事黄土高原退化森林生态系统恢复及森林碳平衡研究. E-mail: houlin1969@163.com

*通讯作者 Corresponding author. E-mail: rdlei@163.com

Foundation item: The project was financially supported by youth foundation item of Northwest A&F University (No. QN-2003-07)

Received date 2006-04-17; **Accepted date** 2006-11-21

Biography: Hou Lin, Ph. D. candidate, Associate professor, mainly engaged in restoration of degraded forest ecosystem on the Loess Plateau and carbon balance of forest ecosystem. E-mail: houlin1969@163.com

should not be protected in FHA way more than 45a. After 45a, mixing suitable tree species, select cutting and other cultivating and managing measures should be adopted.

Key Words : Huanglong Mountain ; natural secondary *Pinus tabulaeformis* forest ; hillsides-closed and afforested ; health of ecosystem ; evaluation

森林生态系统健康是倍受世界范围关注的问题之一,近年来,国外的研究主要集中于森林生态系统健康监测方法、林分结构与物种组成特征、林地土壤中金属元素变化、森林生态系统健康与环境污染及林地生产力等方面^[1~8]。国内的则主要集中于生态系统健康概念与评价指标体系的探讨^[9~13]、林地土壤质量评价^[14~17]、森林生态系统服务功能及价值评价^[18,19]、天然林保护工程对区域经济与生态效益的影响^[20]等方面,大多为指标体系探讨和描述性地研究,针对中小尺度森林生态系统健康状况的定量评价尚不多见^[21,22],有关天然林封育的最佳年限,以往的研究鲜见报道^[23,24]。本研究以黄土高原南部主要天然林区——黄龙山林区6个封育年限的天然次生油松(*Pinus tabulaeformis*)林为研究对象,通过综合分析不同封育年限植被结构特征和林地土壤肥力指标的变化,划分完全封育措施实施效果等级,初步确定该区天然林完全封育措施实施的最佳年限。

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区概况

研究区地处黄土高原高原沟壑区和丘陵沟壑区交错地带的陕西省黄龙县,地理位置为 $109^{\circ}38'49'' \sim 110^{\circ}12'47''E$, $35^{\circ}28'49'' \sim 36^{\circ}02'01''N$ 。林地土壤为褐土,气候属大陆性暖温带半湿润气候类型。年均气温 $8.6^{\circ}C$,极端最高气温为 $36.7^{\circ}C$,极端最低气温为 $-22.5^{\circ}C$, $\geq 10^{\circ}C$ 的年积温为 $2977^{\circ}C$,年日照时数为2370 h,无霜期175 d,年均降水量611.8 mm,区内海拔1100~1300 m,相对高差100~200m。森林植被属暖温带落叶阔叶林地带北部落叶阔叶林亚地带。油松天然次生林在该区主要分布于阴坡,林下植物种类较多。从20世纪50年代起,黄龙山林业局在蔡家川乔榆沟林场实行了封山育林措施以恢复植被,封育方式为全封。目前,通过这种恢复方式形成的多为油松单优群落,乔木层依然可见辽东栎(*Quercus Liaotungensis*)、华北丁香(*Syringa oblata*)、山杨(*Populus davidiana*)、山桃(*Prunus davidiana*)、白桦(*Betula platyphylla*)和漆树(*Toxicodendron vernicifluum*)。灌木层种类相对丰富。

1.2 野外调查与样品分析

以不同封育年限的天然次生油松林为研究对象,在阴坡根据群落外貌和组成设置样地。封育年限通过查阅黄龙山林业局相关资料和访问当地居民确定。选择16a,25a,30a,45a,60a,75a等6个封育年限的林分进行调查。乔木样地大小为 $20\text{ m} \times 20\text{ m}$,乔木样地内按照对角线法分别设置 $2\text{ m} \times 2\text{ m}$ 灌木样方和 $1\text{ m} \times 1\text{ m}$ 的草本样方各5个。乔木每木检尺,记录株数、高度、胸径、冠幅;灌木和草本调查其种类、高度、盖度等,共取乔木样地31个,灌木和草本样方各165个进行群落特征分析。

在比较不同封育年限油松密度时,以 100 m^2 为基础^[24];在分析立木胸径时以实测值为依据,物种多样性指数计算见文献^[23]。

由于表层土壤(0~20cm)受植被影响最大,在每块研究样地上采用常规方法随机选择3个样点采集表层土样^[21]共93个,每个土样重500g左右,带回室内分析。

土样测定前,按常规方法处理^[25]。将水土按体积比2.5:1混合后用pH计测定土壤pH;用重铬酸钾容量法测定有机质含量;采用连续流动分析仪测定硝态氮和铵态氮含量;用 0.5 molL^{-1} 的碳酸氢钠提取土壤样品后,用钼蓝比色法测定速效磷含量;用 1 molL^{-1} 的中性醋酸钠提取土壤样品后,用火焰光度计测速效钾含量^[25]。过氧化氢酶含量用高锰酸钾滴定法测定;脲酶含量用扩散法测定^[26]。同一土样相同指标测定3次,测定结果取均值。

1.3 评价方法

1.3.1 评价指标的筛选

划分所获得的 22 个指标 (表 1) 敏感性等级, 筛选高、中敏感性^[12]的指标建立评价指标体系。

表 1 指标的敏感性分级

Table 1 Sensitive classification of indexes

指标 Index	样本数 Sample	最大值 Maxim	最小值 Minim	平均值 Average	标准差 S. D	变异系数 C. V (%)	敏感度 Sensitive class
乔木层物种丰富度 Richness in arbor	31	12	1	5.33	3.37	63.1	中 Middle
灌木层物种丰富度 Richness in shrub	165	23	3	8.83	5.11	57.9	中 Middle
草本层物种丰富度 Richness in herb	165	41	7	16.5	9.46	57.3	中 Middle
乔木层 Alatalo 均匀度性指数 Alatalo eveness index in arbor	31	0.985	0.07	0.60	0.27	44.6	中 Middle
灌木层 Alatalo 均匀度性指数 Alatalo eveness index in shrub	165	0.885	0.33	0.64	0.39	60.9	中 Middle
草本层 Alatalo 均匀度性指数 Alatalo eveness index in herb	165	0.787	0.09	0.38	0.18	47.4	中 Middle
乔木密度 (株 100m ⁻²) Density of arbor	31	24.71	6.75	13.22	8.38	63.4	中 Middle
灌木密度 (株 100m ⁻²) Density of shrub	165	515	120	313.3	79.3	25.2	低 Low
林分郁闭度 (%) Degree of closing	31	0.6	0.3	0.38	0.12	30.5	低 Low
油松的胸径 (cm) Diameter of breast height (DBH) of <i>P. tabulaeformis</i>	31	33.8	4.1	11.1	6.64	59.7	中 Middle
冠幅 (m ²) Crown diameter	31	30	3	18.3	7.02	38.4	低 Low
树高 (m) Height	31	17.8	3.5	11.4	3.12	27.4	低 Low
更新幼苗数 (株 m ⁻²) Regeneration seedlings	31	9.35	0	2.04	3.09	151.6	高 Height
容重 (gcm ⁻³) Bulk density	93	1.35	0.9	1.05	0.5	5	不敏感 Insensitive
pH 值 pH	93	8.56	8.15	8.3	0.11	1	不敏感 Insensitive
有机质含量 (gkg ⁻¹) Organic matter	93	38.49	17.3	27.3	13.93	51	中 Middle
硝态氮含量 (mgkg ⁻¹) NO ₃ ⁻ -N	93	1.78	8	3.54	2.20	62.2	中 Middle
氨态氮含量 (mgkg ⁻¹) NH ₄ ⁺ -N	93	33.53	12.55	18.68	3.48	18.7	低 Low
速效钾含量 (mg·kg ⁻¹) Available Potassium	93	248.05	150.24	185.71	21.69	11.68	低 Low
速效磷含量 (mg·kg ⁻¹) Available phosphorus	93	9.47	3.15	4.62	1.80	38.9	低 Low
脲酶含量 (mg·kg ⁻¹) Urease	93	0.581	0.085	0.266	0.13	48.8	中 Middle
过氧化氢酶 (0.1molL ⁻¹) CAT	93	23.03	17.32	18.67	0.54	2.9	不敏感 Insensitive

变异系数 ≤ 10% 为不敏感, 10% ≤ 变异系数 ≤ 40% 为低敏感性, 40% ≤ 变异系数 ≤ 100% 为中敏感性, 变异系数 ≥ 100% 为高敏感

C. V ≤ 10% , 10% ≤ C. V ≤ 40% , 40% ≤ C. V ≤ 100% and C. V ≥ 10% is insensitive , low , middle and high sensitive respectively

1.3.2 评价指标体系的建立

作为衡量天然林封育效果的指标体系,不仅应遵循客观性、科学性、完整性、有效性的普遍原则外,指标体系的建立还应遵循以下原则:(1)生态系统的健康性原则;(2)生态系统的完整性与可识别性原则;(3)体现对生态系统健康要求的前瞻性与超前性原则;(4)指标的可比、可量、可行原则;(5)因子和标准选取的敏感性原则;(6)与研究区的尺度大小相适应的原则。

根据森林生态系统健康及其评价的内涵和目前国内外有关生态系统健康评价的方法^[1~9,11,12,14],采用层次分析法(AHP)^[27]建立了3个层次的封育效果评价指标体系(表2)。

表2 封育效果评价指标体系

Table 2 Index system of assessment effects on hillsides-closed and afforested measure

目标层 Object	准则层 Item	指标层 Index
封育效果评价综合指数 Hillsides-closed and afforested measure index	植被特征 Traits of vegetation	乔木层物种丰富度 Richness in arbor
		灌木层物种丰富度 Richness in shrub
		草本层物种丰富度 Richness in herb
		乔木层 Alatalo 均匀度性指数 Alatalo eveness index in arbor
		灌木层 Alatalo 均匀度性指数 Alatalo eveness index in shrub
		草本层 Alatalo 均匀度性指数 Alatalo eveness index in herb
	土壤特征 Traits of soil	乔木密度 (株 100m ⁻²) Density of arbor
		油松的平均胸径 (cm) Average DBH of <i>P. tabulaeformis</i>
		更新幼苗数 (株 m ⁻²) Regeneration seedlings
		有机质含量 (gkg ⁻¹) Organic matter
		硝态氮含量 (mgkg ⁻¹) NO ₃ ⁻ -N
		脲酶含量 (mgkg ⁻¹) Urease

1.3.3 指标标志值的确定

按照上述构建的健康评价指标体系框架和原则,判断矩阵元素量化标度可分为9级,本研究采用专家意见法确定判断矩阵指标值^[27]。

1.3.4 指标权重的确定

由于各个指标的重要性和贡献率不同,采用层次分析法(AHP)并参考专家的意见确定评价指标的权重。经构造判断矩阵、层次总排序和一致性检验后,得各指标在总排序中的权重值。利用各指标在总排序中的权重值除以该指标所属层次各指标总排序权重之和,得到各层次下各指标的最终权重值^[28](表3)。

表3 评价指标权重值

Table 3 Weight value of the assessment indexes

准则层 Item	权重值 Weight value	指标号 No.	指标层 Index	权重值 Weight value
植被特征 Traits of vegetation	0.67	1	乔木层物种丰富度 Richness in arbor	0.22
		2	灌木层物种丰富度 Richness in shrub	0.09
		3	草本层物种丰富度 Richness in herb	0.04
		4	乔木层 Alatalo 均匀度性指数 Alatalo eveness index in arbor	0.13
		5	灌木层 Alatalo 均匀度性指数 Alatalo eveness index in shrub	0.05
		6	草本层 Alatalo 均匀度性指数 Alatalo eveness index in herb	0.04
		7	乔木密度 (株 100m ⁻²) Density of arbor	0.21
		8	油松的胸径 (cm) Diameter of breast height (DBH) of <i>P. tabulaeformis</i>	0.42
		9	更新幼苗数 (株 m ⁻²) Regeneration seedlings	0.30
土壤特征 Traits of soil	0.33	10	有机质含量 (gkg ⁻¹) Organic matter	0.65
		11	硝态氮含量 (mgkg ⁻¹) NO ₃ ⁻ -N	0.19
		12	脲酶含量 (mgkg ⁻¹) Urease	0.16

1.3.5 综合评价模型

尽管 AHP 可以确定评价指标对封育效果的贡献量,但由于指标间量纲不统一,缺乏可比性。因此,在利用上述指标时,须对参评因子进行标准化处理^[29],以克服参数间的不可比性,参评因子标准化公式如下:

$$Y = \frac{x_i - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}} \times 10$$

式中, Y 为参评因子的标准化赋值; x_i 为实测值的均值; x_{\max} 为实测最大值; x_{\min} 为实测最小值。 Y 大则表示该因子对封育效果的影响大,反之则小。

各指标的最终赋值 $S_i = Y \times W_i$,式中, S_i 为指标的最终赋值, W_i 为权重。

根据各指标的最终赋值结果,结合 AHP 综合评价模型计算出的权重,各封育年限封育措施实施效果综合指数 R ^[29]为:

$$R = k_v \sum_{i=1}^n S_i W_i + k_s \sum_{j=1}^m S_j W_j$$

式中, R 为封育措施实施效果综合指数值, k_v 、 k_s 分别为准则层植被和土壤特征的权重值, n 、 m 分别为指标层植被与土壤的指标数。

封育措施实施效果综合指数值由多个要素加权所得,计算结果随机分布在 0~10 之间,本研究采用等间距法将封育措施实施效果综合指数划分为 5 个等级,并给出了相应的评语(表 4)。

表 4 黄龙山林区封育天然林健康评价标准

Table 4 Criterion of hillsides-closed and afforested natural forest health assessment at Huanglong Mountain

综合评价值 Value of integrate assessment	$0 \leq R < 2$	$2 \leq R < 4$	$4 \leq R < 6$	$6 \leq R < 8$	$8 \leq R \leq 10$
评判标准 Criterion of assessment	极差 Worst	较差 Worse	中等 Average	良好 Adequate	优良 Choice

2 结果分析

2.1 评价指标的数据源

6 个封育年限评价指标实测值、最大值和最小值如表 5。

2.2 全封方式对植被的影响

封育前 45a,物种处于旺盛生长期,林分郁闭度小,林内光照充足,林地肥力较高^[24],油松个体的胸径持续增大,喜光的乔木树种与灌木、草本迅速侵入,林内各层的物种丰富度增加。此阶段乔木层与灌木层对有效生存空间竞争激烈,导致乔木层密度增加,灌木密度减小,物种分布趋于不均匀,均匀度指数表现出不规律变化(表 5)。由此可见,全封育方式在前 45a,有利于林分复层结构地形成和抗逆性与稳定性地提高。

封育 45a 后,随着封育年限增加,油松的叶迅速增加造成林内郁闭度加大^[17],林内光照条件变差,林内环境趋于稳定,喜光的乔、灌木树种逐渐消退,个别耐荫树种间断出现于个别地段^[23],乔、灌、草 3 层物种丰富度无明显变化。由于乔木层优势木地胁迫,乔、灌层的物种均匀度下降,草本建群种因根系发达、丛幅较大,占据了与其生物学特性相适应的空间,物种均匀度有所增大。自封育 45a 起,油松具备了更新能力^[24],随着封育年限增加,油松密度与更新幼苗数逐渐增大。但增加的油松多为优势木树冠下更新产生的幼苗和弱小幼树,树龄 28~33a 的个体,胸径多在 2.0~3.3cm 间,形、质极差且枯立木较多^[24]。根据对油松和灌木密度地预测,封育至 100a 时,其密度分布以中密度为主^[24],全封方式已不适应封育 45a 后的林分,为了优化林分结构,给幼苗生长提供充足的空间,应对该阶段的林分进行择伐。

2.3 全封方式对林地土壤特性的影响

枯落物归还土壤是林地自我培肥地力的主要途径之一^[15]。封育的前 45a,随着封育年限增加,乔、灌木个体迅速生长,草本丰富度增加,物种对土壤肥力消耗较大,而归还则较少,此阶段林地土壤有机质含量减少。

封育 45a 后, 枯落物归还量较大, 灌木密度在下降, 乔木的密度虽在增加, 但增加的多为幼苗和生长不良的弱小植株, 林地肥力消耗较小, 林地土壤有机质含量增大。在 6 个封育年限内, NO_3^- -N 和脲酶含量则表现出不规律地变化。目前人们普遍认为, 树种对 NH_4^+ -N 和 NO_3^- -N 吸收的偏好特性可能主要与其生长地的土壤 pH 有关^[30], 有研究表明, 来自于酸性土壤的树种通常具有喜 NH_4^+ -N 的特性, 而来自于中性或碱性土壤的树种具有喜 NO_3^- -N 的趋势^[31, 32]。 NO_3^- -N 含量的变化可能与树种在长期适应过程中形成了对 N 素的选择性吸收有关。脲酶含量的变化则是由于其含量低, 未与群落变化表现出相关性。

表 5 指标得分资料来源

Table 5 Source of indices

测值 Value	指标号 No.											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
封育 16a Hillside-closed and afforested 16a												
x_i	3	4	8	0.12	0.58	0.4	11.5	3.6	0	21.4	2.98	0.206
x_{\max}	5	6	12	0.16	0.69	0.5	12.3	4.2	0	25.5	3.36	0.324
x_{\min}	1	3	5	0.07	0.35	0.18	4.8	1.9	0	15.3	2.09	0.107
封育 25a Hillside-closed and afforested 25a												
x_i	6	7	16	0.932	0.531	0.124	14.4	4.5	0	20.06	2.89	0.335
x_{\max}	8	9	19	0.985	0.64	0.141	19	4.8	0	26.01	2.94	0.403
x_{\min}	2	5	10	0.761	0.33	0.08	5.5	4.1	0	15.72	2.27	0.207
封育 30a Hillside-closed 30a												
x_i	8	18	35	0.713	0.658	0.288	14.2	8.6	0	18.53	8	0.468
x_{\max}	10	21	41	0.826	0.722	0.415	15.5	9.3	0	22.54	8.68	0.581
x_{\min}	3	7	12	0.454	0.418	0.107	6.8	5.3	0	15.99	7.11	0.247
封育 45a Hillside-closed and afforested 45a												
x_i	4	5	14	0.668	0.885	0.388	9.95	14.6	0.6	23.61	2.31	0.206
x_{\max}	6	7	17	0.712	0.891	0.417	21.25	15.9	1.3	29.72	2.88	0.272
x_{\min}	1	3	10	0.614	0.837	0.302	6.75	10.7	0.58	21.57	2.19	0.197
封育 60a Hillside-closed and afforested 60a												
x_i	5	8	14	0.644	0.594	0.453	14.68	15.6	7.34	29.75	2.45	0.09
x_{\max}	7	9	15	0.739	0.636	0.491	19.7	17.6	9.35	34.01	3.02	0.111
x_{\min}	2	7	11	0.639	0.567	0.423	13.95	12.4	6.58	28.69	2.33	0.085
封育 75a Hillside-closed and afforested 75a												
x_i	5	11	14	0.549	0.576	0.649	15.61	19.6	4.29	34.23	2.4	0.29
x_{\max}	9	14	16	0.612	0.68	0.787	24.71	23.8	6.58	38.49	2.78	0.37
x_{\min}	1	6	9	0.533	0.553	0.645	14.25	19.3	4.19	33.5	1.84	0.27

* 本表中各指标含义同表 3 Indexes in table 5 have same meaning as they in table 3

2.4 全封方式的总体评价

根据各指标的权重赋值结果(表 3)及各指标得分资料来源(表 5)计算出不同封育年限封育措施实施效果最终得分(表 6)。

由表 6 可见, 随着封育年限增加, 完全封育措施实施效果的综合指数得分值减小, 封育的前 45a, 完全封育措施实施效果分别为良好和中等, 封育 45a 后, 完全封育措施实施效果均为中等且有向较差等级发展的趋势。

3 结论与讨论

根据封育后天然林的特点, 从植被和土壤特征 2 个方面选取乔、灌、草各层物种丰富度指数和均匀度指数(Alatalo), 乔木密度, 油松的胸径与更新幼苗数, 林地表层土壤有机质、硝态氮和脲酶含量等 12 个高、中敏感性

表 6 各封育年限封育措施实施效果总体评价

Table 6 Integrate evaluation on effect in series of hillside-closed and afforested ages

封育年限 Hillside-closed and afforested ages (a)	最终得分 Ultimate score	评价 Remark
16	7.25	良好 Adequate
25	6.88	良好 Adequate
30	7.82	良好 Adequate
45	5.51	中等 Average
60	4.78	中等 Average
75	2.79	中等 Average

指标,构建了完全封育方式实施效果的评价指标体系,其中植被特征指标可通过群落调查直接获得,土壤特征指标通过室内分析获得,所选择的评价指标完全可在生产实践中直接应用。

本研究结果表明完全封育方式适于封育前 45a 的天然油松林,同类研究显示油松林地上部分养分的年积累量以 30a 最高^[7],该区天然林完全封育方式实施年限最长不应超过 45a。

在天然林保护中一成不变地采用完全封育方式,并不能达到理想的效果。研究证明,择伐是最适合天然松林的一种作业方式^[33]。择伐可减少林木自然枯损,充分发挥每株树木的自然生长潜力,为后备资源提供良好的生态环境,缩短森林的培育期限,同时能最大限度地利用林地生产力,有利于营养物质的合理循环,提高土壤肥力,维持森林生态系统组成和结构的多样性,提高森林的抗性和稳定性,充分利用森林天然更新潜力,保证森林的恢复能力,减少育林成本。因此在本区天然林完全封育 45a 后,应根据林分结构动态、树种更新能力、林地肥力等状况,采取引阔保针、择伐等相应的培育与经营措施,不断优化林分的树种、胸径、密度结构,减少林地可燃物,降低林分的火险等级,以期形成持续、稳定的天然林生态系统。

在我国,对森林生态系统健康领域的认识和研究尚处于起步阶段,本文从微域尺度上评价了完全封育方式对天然林的影响,希望此项研究有助于改变人们对天然林保护方式的认知。受多方面因素的影响,所建指标体系还存在一定的局限性,尚待进一步完善,应尽快开展主要森林生态系统类型的健康评价及基础研究。

References :

- [1] Hale C M, Pastor J, Rusterholz K A. Comparison of structural and compositional characteristics in old-growth and mature, managed hardwood forests of Minnesota, U. S. A. *Can. J. For. Res*, 1999, 29: 1479—1489.
- [2] Dobbertin M, Mizoue N. Detecting differences in crown transparency assessment between countries using the image analysis system CROCO. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2003, 89: 179—195.
- [3] Marco Ferretti. Forest health assessment and monitoring — issues for consideration. *Environmental Monitoring and Assessment*, 1997, 48: 45—72.
- [4] Eisenbies M H, Burger J A, Aust W M *et al.* Assessing change in soil-site productivity of intensive managed Loblolly Pine plantation. *Soil Science Society of American Journal*, 2006, 70: 130—140.
- [5] Musio M, Augustin N, Kahle H P *et al.* Predicting magnesium concentration in needles of silver fir and Norway spruce — a case study. *Ecology Model*, 2004, 179: 307—316.
- [6] Oszlanyi J. Forest health and environmental pollution in Slovakia. *Environment Pollution*, 1997, 98 (3): 389—392.
- [7] Samuel A. Alexander, Craig J. Palmer. Forest health monitoring in the united states first four years. *Environmental Monitoring and Assessment*, 1999, 55: 267—277.
- [8] Walter Seidling. Outline and examples for integrated evaluations of data from the intensive (Level II) monitoring of forest ecosystems in Germany. *Eur J Forest Res*, 2005, 124: 273—287.
- [9] 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.
- [10] Kong H M, Zhao J Z, Ji L Z *et al.* Assessment method of ecosystem health. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2002, 13 (4): 486—490.
- [11] Xiao F J, Ouyang H, Fu B J *et al.* Forest ecosystem health assessment Indicators and application in China. *Acta Geographica Sinica*, 2003, 58 (6): 803—809.
- [12] Xu M X, Liu G B, Zhao Y G. Assessment indicators of soil quality in hilly Loess Plateau. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2005, 16 (10): 1843—1848.
- [13] Yuan X Z, Liu H, Lu J J. Assessment of ecosystem health — concept framework and indicator selection. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2001, 12 (4): 627—629.
- [14] Huang Y, Wang S L, Feng Z W, *et al.* Soil quality assessment of forest stand in different plantation ecosystems. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2004, 15 (12): 2199—2205.
- [15] Zhang X B, Shang Guan Z P. Nutrient distributions and bio-cycle patterns in both natural and artificial *Pinus tabulaeformis* forests in Hilly Loess regions. *Acta Ecologica Sinica* 2005, 25 (3): 527—537.
- [16] Liu J, He W M, Fang Z M. Spatial characteristics of soil moisture and organic matter and light in *Pinus tabulaeformis* forest and *Quercus liaotungensis* forest on Dongling Mountain, Beijing, China. *Acta Ecologica Sinica* 2005, 25 (11): 2954—2960.
- [17] Zhang X B, Shang Guan Z P. Nutrient distributions and bio-cycle patterns in both natural and artificial *Pinus tabulaeformis* forests in Hilly Loess regions. *Acta Ecologica Sinica* 2006, 26 (2): 373—382.
- [18] Jin F, Lu S W, Yu X X *et al.* Forest ecosystem service and its evaluation in China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2005, 16 (8): 1531—1536.

- [19] Zhao T Q ,Ouyang Z Y ,Zheng H *et al.* . Forest ecosystem services and their valuation in China. *Journal of Natural Resources* ,2004 ,19 (4) :480—491.
- [20] Liu C ,Meng Q H ,Li Y M , *et al.* . A case study on ecological and socioeconomic benefit evaluation of Sichuan provincial natural forest protective project. *Acta Ecologica Sinica* ,2005 ,25 (3) :428—434.
- [21] Dai L M ,Chen G ,Deng H B *et al.* . Structure characteristics and health distance assessment of various disturbed communities of Korean pine and broadleaved mixed forest in Changbai Mountains. *Chinese Journal of Applied Ecology* ,2004 ,15 (10) :1750—1754.
- [22] Ji L Z ,Liu Z G ,Hao Z Q *et al.* . Effect of cones picking on broad-leaved *Pinus koraiensis* forest in Changbai mountains. *Chinese Journal of Ecology* ,2002 ,21 (3) :39—42.
- [23] Hou L ,Lei R D ,Kang B W *et al.* . Traits of plant diversity in a hill-closed and afforestation sequence of *Pinus tabulaeformis* stands in Huanglong Mountains. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica* ,2004 ,24 (7) :1165—1172.
- [24] Hou L ,Lei R D ,Liu J J *et al.* . Dynamic characteristics of hillsides-closed afforested *Pinus tabulaeformis* population in Huanglongshan forest zone. *Chinese Journal of Ecology* ,2005 ,24 (11) :1263~1266.
- [25] Xue L ,Kuang L G ,Chen H Y *et al.* . Soil nutrients ,microorganisms and enzyme activities of different stands. *Acta Pedologica Sinica* ,2003 ,40 (2) :280—285.
- [26] Guan S Y. *Soil enzyme and its method.* Beijing :Agriculture Publishing House ,1986. 1—13.
- [27] Wang Q ,Wu S J ,Xiao F *et al.* . Stability evaluation of ecosystem on Honghu Lake wetlands. *Chinese Journal of Eco-Agriculture* ,2005 ,13 (4) :178—180.
- [28] Xie H L ,L B ,Wang C S *et al.* . Agroecosystem health assessment in western China. *Acta Ecologica Sinica* ,2005 ,25 (11) :3228—3236.
- [29] Li S N ,Zhao Y Z ,Shi P J. Method and application of ecological security analysis in Tibet Plateau — A case study in Qusum county. *Research of Soil and Water Conservation* ,2005 ,12 (6) :142—145.
- [30] Zhang Y D ,Bai S B. Effects of nitrogen forms on nutrient uptake and growth of trees. *Chinese Journal of Ecology* ,2003 ,14 (11) :2044—2048.
- [31] Nelson L E ,Selby R. The effect of nitrogen sources and iron levels on the growth and composition of Sitka spruce and Scots pine. *Plant and Soil* ,1974 ,58 :573—588.
- [32] Stadler J ,Gebauer G. Nitrate reduction and nitrate content in ash trees (*Fraxinus excelsior* L.) :distribution between compartments ,site comparison and seasonal variation. *Trees* ,1992 ,6 :236—240.
- [33] Liu B F ,Lü R T. Forest ecological harvesting and forest biodiversity protection. *Forest Engineering* ,2004 ,20 (3) :5—6. .

参考文献:

- [9] 陈高 ,代力民 ,范竹华 等. 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.
- [10] 孔红梅 ,赵景柱 ,姬兰柱 等. 生态系统健康评价方法初探. *应用生态学报* ,2002 ,13 (4) :486~490.
- [11] 肖风劲 ,欧阳华 ,傅伯杰 等. 森林生态系统健康评价指标及其在中国的应用. *地理学报* ,2003 ,58 (6) :803~809.
- [12] 许明祥 ,刘国彬 ,赵允格. 黄土丘陵区土壤质量评价指标研究. *应用生态学报* ,2005 ,16 (10) :1843~1848.
- [13] 袁兴中 ,刘红 ,陆健健. 生态系统健康评价——概念构架与指标选择. *应用生态学报* ,2001 ,12 (4) :627~629.
- [14] 黄宇 ,汪思龙 ,冯宗炜 等. 不同人工林生态系统林地土壤质量评价. *应用生态学报* ,2004 ,15 (12) :2199~2205.
- [15] 张希彪 ,上官周平. 黄土丘陵区主要林分生物量及营养元素生物循环特征. *生态学报* ,2005 ,25 (3) :527~537.
- [16] 刘建 ,何维明 ,房志玲. 东灵山油松林和辽东栎林下土壤资源和光资源的空间特征. *生态学报* ,2005 ,25 (11) :2954~2960.
- [17] 张希彪 ,上官周平. 黄土丘陵区油松人工林与天然林养分分布和生物循环比较. *生态学报* ,2006 ,26 (2) :373~382.
- [18] 靳芳 ,鲁绍伟 ,余新晓 等. 中国森林生态系统服务功能及其价值评价. *应用生态学报* ,2005 ,16 (8) :1531~1536.
- [19] 赵同谦 ,欧阳志云 ,郑华 等. 中国森林生态系统服务功能及其价值评价. *自然资源学报* ,2004 ,19 (4) :480~491.
- [20] 刘璨 ,孟庆华 ,李育明 等. 我国天然林保护工程对区域经济与生态效益的影响——以四川省峨边县和盐边县为例. *生态学报* ,2005 ,25 (3) :428~434.
- [21] 代力民 ,陈高 ,邓红兵 等. 受干扰长白山阔叶红松林林分结构组成特征及健康距离评估. *应用生态学报* ,2004 ,15 (10) :1750~1754.
- [22] 姬兰柱 ,刘足根 ,郝占庆 等. 松果采摘对长白山阔叶红松林生态系统健康的影响. *生态学杂志* ,2002 ,21 (3) :39~42.
- [23] 侯琳 ,雷瑞德 ,康博文 等. 黄龙山林区油松封育过程中植物物种多样性特征. *西北植物学报* ,2004 ,24 (7) :1165~1172.
- [24] 侯琳 ,雷瑞德 ,刘建军 等. 黄龙山林区封育油松种群动态研究. *生态学杂志* ,2005 ,24 (11) :1263~1266.
- [25] 薛立 ,邝立刚 ,陈红跃 等. 不同林分土壤养分、微生物与酶活性的研究. *土壤学报* ,2003 ,40 (2) :280~285.
- [26] 关松荫. *土壤酶及其研究法.* 北京 :农业出版社 ,1986. 1~13.
- [27] 王茜 ,吴胜军 ,肖飞 等. 洪湖湿地生态系统稳定性评价研究. *中国生态农业学报* ,2005 ,13 (4) :178~180.
- [28] 谢花林 ,李波 ,王传胜 等. 西部地区农业生态系统健康评价. *生态学报* ,2005 ,25 (11) :3228~3236.
- [29] 李苏楠 ,赵延治 ,史培军. 青藏高原生态安全评价方法与应用——以西藏自治区曲松县为例. *水土保持研究* ,2005 ,12 (6) :142~145.
- [30] 张彦东 ,白尚斌. 氮素形态对树木养分吸收和生长的影响. *应用生态学报* ,2003 ,14 (11) :2044~2048.
- [33] 刘滨凡 ,吕任涛. 森林生态采伐与森林生物多样性保护. *森林工程* ,2004 ,20 (3) :5~6.