

# 受损常绿阔叶林生态系统退化评价指标体系和模型

杨 娟<sup>1</sup>, 李 静<sup>2</sup>, 宋永昌<sup>1,\*</sup>, 蔡永立<sup>1</sup>

(1. 华东师范大学资源与环境学院, 城市化生态过程与生态恢复上海市重点实验室, 上海 200062;

2. 安徽农业大学林学与园林学院, 合肥 230036)

**摘要:** 为了对受损常绿阔叶林生态系统退化程度进行定量评价, 在浙江天童亚热带常绿阔叶林生态系统研究的基础上, 以地带性顶级群落——栲树林为参照, 选取不同退化程度的次生类型: 木荷林、马尾松 + 木荷林、马尾松林、灌丛以及裸地, 从轻到重分别代表 5 种不同退化程度。根据对这 5 种退化阶段群落的观测结果, 从生态系统的组成结构、功能和生境 3 方面选取了 43 项指标, 再运用主成分分析、无重复双因素方差分析等数学分析方法经过两轮筛选, 得到了一个包含 13 项指标的常绿阔叶林生态系统退化程度诊断的指标体系。根据层次单排序的结果, 进行层次总排序, 在得到各级指标的权重基础上, 构建了常绿阔叶林生态系统退化综合评价模型, 并就模型分析结果, 用生态退化指数将常绿阔叶林的退化程度分为 5 级: Ⅰ级——极端退化 ( $> 0.75$ ), Ⅱ级——重度退化 ( $0.59 \sim 0.75$ ), Ⅲ级——中度退化 ( $0.52 \sim 0.59$ ), Ⅳ级——轻度退化 ( $0.18 \sim 0.52$ ) 和 Ⅴ级——正常 ( $< 0.18$ )。再利用鼎湖山国家自然保护区有关退化植被的研究数据对模型进行了验证, 评价结果与模型所给出的退化评价标准较为符合, 表明了本评价指标体系和模型的适用性。

**关键词:** 受损常绿阔叶林; 退化程度评价; 指标体系; 模型

文章编号: 1000-0933(2006) 11-3749-08 中图分类号: S718.55 文献标识码: A

## A model to assess the degradation degree of damaged evergreen broad-leaved forest ecosystem

YANG Juan<sup>1</sup>, LI Jing<sup>2</sup>, SONG Yong-Chang<sup>1,\*</sup>, CAI Yong-Li<sup>1</sup> (1. School of Resources & Environmental Sciences, East China Normal University, Shanghai Key Laboratory for Ecology of Urbanization Process and Eco-Restoration, Shanghai 200062, China; 2. College of Forest and Garden, Anhui Agricultural University, Anhui Hefei 230036, China). Acta Ecologica Sinica, 2006, 26(11): 3749 ~ 3756.

**Abstract:** In order to quantitatively assess the degradation degree of damaged evergreen broad-leaved forest ecosystem, we constructed an assessment model based on the studies of evergreen broad-leaved forest ecosystem in Tiantong National Forest Park, Zhejiang Province, which includes the undamaged climax community, i. e., *Castanopsis fargesii* forest, and five secondary communities with different degree of degradation, ordering from lower to higher: *Schima superba* forests, *Pinus massoniana* + *Schima superba* forests, *Pinus massoniana* forests, shrubs and bare land, respectively. Forty-three parameters concerning structure, functioning and habitat of ecosystem obtained from the above mentioned communities were selected as candidate factors by one-way ANOVA. After using principle component analysis and two-factor without replicated ANOVA, a model including 13 parameters was gained after two times of screening. Using hierarchical analysis, we proposed index for each parameters and its weight. An integrated model to assess degradation degree was constructed with these indices. After given a standard value,

**基金项目:** 国家自然科学基金重点研究资助项目 (30130060)

**收稿日期:** 2006-01-11; **修订日期:** 2006-06-10

**作者简介:** 杨娟 (1979 ~), 女, 河南人, 博士生, 主要从事生态模型和恢复生态学研究. E-mail: yangjuan01 @sohu.com

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: ycsong @des.ecnu.edu.cn

**致谢:** 华东师范大学陈小勇教授、由文辉教授、达良俊教授、王希华教授、李俊祥副教授、易兰博士、河南大学丁圣彦教授等提出宝贵的意见, 谨此致谢!

**Foundation item:** The project was financially supported by National Natural Science Key Foundation of China (No. 30130060)

**Received date:** 2006-01-11; **Accepted date:** 2006-06-10

**Biography:** YANG Juan, Ph. D. candidate, mainly engaged in ecological model and restoration ecology. E-mail: yangjuan01 @sohu.com

degradation of each community was classified into one of the five categories: extra-heavy degradation ( $> 0.75$ ), heavy degradation ( $0.59 \sim 0.75$ ), medium degradation ( $0.52 \sim 0.59$ ), slight degradation ( $0.18 \sim 0.52$ ) and normal ( $< 0.18$ ). We also verified the model with the data of evergreen broad-leaved forest in Dinghu Mountain National Reserve of Guangdong Province, and assessments were in accord with the actual situation.

**Key words:** damaged evergreen broad-leaved forest ecosystem; assessment of degradation degree; index system; model

生态退化是目前全球面临的主要环境问题之一,它不仅导致自然资源日益枯竭、生物多样性不断下降,而且还严重阻碍社会经济的可持续发展,进而威胁人类的生存和发展,生态退化已引起各国政府和学者的高度重视,生态系统退化和退化生态系统的恢复已成为当前生态研究的热点之一<sup>[1]</sup>。对退化程度的诊断是生态系统退化研究中首先遇到和必须解决的问题,也是进行退化生态系统恢复与重建的基础和前提<sup>[2]</sup>。

国内外对于生态系统退化评价已开展不少研究。首先是关于生态系统退化类型的划分,其中有根据生态系统受损程度进行划分的<sup>[3~5]</sup>,有根据生态系统稳定程度<sup>[6]</sup>和生态系统受损后的直接结果(或表现)划分的<sup>[7]</sup>,还有根据植物种类组成、生物量、土壤状况等进行划分的<sup>[8]</sup>,而关于常绿阔叶林的退化,余作岳等<sup>[9]</sup>在热带亚热带生态系统植被恢复研究中曾划分了退化类型,并指出需要进行退化程度的研究。关于生态系统退化的评价,主要有区域或景观水平上的土地退化评价<sup>[10~14]</sup>,此外还曾提出了一个包括土壤、植被、大气、水体,以及农业生态系统、区域复合生态系统退化的评价指标体系<sup>[15]</sup>;在对具体类型生态系统的退化评价上,有湿地生态系统退化评价<sup>[16]</sup>、土壤退化评价<sup>[17~18]</sup>、红树林的退化评价<sup>[19]</sup>和落叶林的退化评价<sup>[20,21]</sup>。在研究方法上,由于多数研究还处于定性水平,为实现对生态系统退化的定量评价,对生态系统退化的概念模型、生态系统退化诊断途径、退化诊断指标以及测量流程等进行了讨论<sup>[2]</sup>。

总的来看,目前大多数研究都集中在理论的探讨,关于具体生态系统的研究还不多,而且多数是对荒漠生态系统和草原生态系统的退化研究,涉及到森林生态系统的很少,本项研究以浙江天童受损常绿阔叶林生态系统为例,对如何评价亚热带常绿阔叶林的退化程度进行了探讨。

## 1 常绿阔叶林生态系统退化评价指标体系的建立

本文作为“受损常绿阔叶林生态系统退化机制研究”的一部分,在各项研究的基础上,以我国东部亚热带常绿阔叶林的优势群落栲树林<sup>[22]</sup>为顶级群落,然后分别选取了退化程度由低到高的木荷林、马尾松+木荷林、马尾松林、灌丛、裸地5种类型代表不同退化程度的次生演替阶段,根据各阶段群落退化特征的观测结果,建立常绿阔叶林退化评价的指标体系。

### 1.1 退化评价指标体系指标选取原则

指标体系的建立是评价工作首要的和关键的一步,它直接影响到评价结果的准确性和科学性。森林生态系统的退化是一个复杂的过程,涉及的因素很多,它既可表现在物种、种群、群落以及景观水平上,也可表现在系统的组成、结构、功能、动态、生境条件等方面,它们都可作为评价指标,因而可以有单途经单因子诊断法、单途经多因子诊断法和多途经综合诊断法<sup>[2]</sup>。但是构建一个评价指标体系,不应该仅是一维简单的物理量,而应是由多属性组成的多维多层的向量。对于如何建立生态系统退化评价指标,一些研究者也曾进行过讨论<sup>[2,15,23]</sup>,归纳起来,为常绿阔叶林生态系统退化评价指标体系的建立需要体现以下几点原则:

- (1) 综合性 常绿阔叶林生态系统组成结构复杂,选取的评价指标须能直接而全面地反映其综合特征;
- (2) 代表性 常绿阔叶林生态系统具多种综合功能,选取的评价指标要最能反映系统的主要性状;
- (3) 灵敏性 常绿阔叶林生态系统的退化特征可在系统许多方面得到反应,选用的指标需要能灵敏反应系统的退化性;
- (4) 层次性 根据不同评价需要和详尽程度可对指标分层分级;
- (5) 实用性 选用的指标须可测度、可比较、可操作,在较长时期和较大范围内都能使用。

### 1.2 常绿阔叶林退化评价指标体系的构建方法

根据退化评价指标体系选择原则,构建了一个 3 层次结构的评价指标体系的结构。以生态退化指数 (Index of Ecological Degradation, IED) 作为总目标层,用以评价常绿阔叶林生态系统的退化程度。一级指标为准则层,是生态系统退化的直接表现,由生态系统的组成结构( $F_1$ )、功能( $F_2$ )和生境( $F_3$ )3 部分构成;二级指标为子准则层,是对各准则层的详细分解,本文以植物群落( $S_1$ )、土壤动物群落( $S_2$ )、土壤微生物群落( $S_3$ )、物质生产与循环( $S_4$ )、土壤生化作用强度与酶活性( $S_5$ )、小气候( $S_6$ )和土壤条件( $S_7$ )作为二级指标的评判指标;三级指标为指标层,由可直接度量并能体现各子准则层指标所代表特征的指标构成。

(1) 三级指标的初步选择 结合对浙江天童常绿阔叶林退化过程的研究,采用单因素方差分析法,初步选取能反映群落退化特征的一些指标 ( $p < 0.05$ )。其中反映群落组成结构特征的三级指标 17 项,反映系统功能方面特征的三级指标 14 项,反映系统生境方面特征的三级指标 12 项,具体见表 1。

表 1 受损常绿阔叶林退化评价指标  
Table 1 Degradation Evaluation elementary indices of damaged evergreen broad-leaved forest ecosystem

| 综合指标<br>Integrated<br>indicator                    | 一级指标<br>1st level<br>indicator                       | 二级指标<br>2nd level<br>indicator                                | 初步选择三级指标<br>Pre-selected 3rd level indicator                                                                                                                                                                                                                                            |
|----------------------------------------------------|------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 生态退化指数 (IED)<br>index of ecological<br>degradation | 生态系统的<br>组成结构 ( $F_1$ )<br>Structure of<br>ecosystem | 植物群落 ( $S_1$ )<br>Plant Community                             | 物种数 number of species; 多样性指数 Shannon- Wiener diversity index; 群落<br>乔木层高度 height of tree layer; 群落盖度 coverage of community; 演替度<br>degree of succession; 植株密度 density of plants                                                                                                         |
|                                                    |                                                      | 土壤动物群落<br>( $S_2$ ) Soil animal<br>community                  | 土壤动物总密度 total density of soil animals; 类群总数 total number of<br>groups; A/C (蜱螨目与弹尾目个体数量比) ratio of animal number of<br><i>Arcarina</i> and <i>Collembola</i>                                                                                                                            |
|                                                    |                                                      | 土壤微生物<br>群落 ( $S_3$ )<br>Soil microbe<br>community            | 微生物总数量 soil microbe amount; 细菌数量 bacterium amount; 真菌数量<br>fungi amount; 放线菌数量 actinomycete amount; 氨化细菌数量 ammonifiers<br>amount; 固氮菌数量 nitrogen-fixing bacteria amount; 纤维素分解菌数量<br>celluloseutilizing bacteria amount; 硝化细菌数量 nitro- bacteria amount                                  |
|                                                    | 生态系统的<br>功能 ( $F_2$ )<br>Function of<br>ecosystem    | 物质生产与循环<br>( $S_4$ ) Matter<br>making and cycling             | 总生物量 total biomass; 年净初级生产力 annual net primary productivity; 凋<br>落物数量 litter fall amount; 凋落物分解率 decomposition rate of litter fall                                                                                                                                                     |
|                                                    |                                                      | 土壤生化作用<br>强度与酶活性<br>( $S_5$ )<br>Soil microbial<br>activities | 氨化作用强度 ammonification; 硝化作用强度 nitrification; 反硝化作用强<br>度 denitrification; 纤维素分解强度 cellulose decomposition efficiency; 呼吸速<br>率 soil respiration; 纤维素酶活性 cellulose activity; 蛋白酶活性 protease<br>activity; 脲酶活性 urease activity; 过氧化氢酶活性 catalase activity; 磷酸酶<br>活性 phosphatase activity |
|                                                    | 生态系统的<br>生境条件 ( $F_3$ )<br>Habitat of<br>ecosystem   | 小气候 ( $S_6$ ) *<br>Microclimate                               | 群落内外空气湿度比值 air humidity ratio; 群落内外气温比值 air<br>temperature ratio; 群落内外相对光照比值 relative light intensity ratio                                                                                                                                                                             |
|                                                    |                                                      | 土壤条件 ( $S_7$ ) **<br>Soil condition                           | 土壤容重 soil bulk density; 土壤总空隙度 total soil porosity; 土壤通气度<br>soil ventilation degree; 土壤含水量 soil water content; pH 值 pH value; 有机<br>质含量 organic matter content; 全氮含量 soil total nitrogen content; 速效磷含<br>量 soil available P; 速效钾含量 soil available K                                   |

\* 各指标比值是指在夏季晴朗天气条件下距地面 1.5m 高处群落内外对比值 (the ratio of microclimate between inside and outside community is qualified 1.5m high from ground in sunny summer day); \*\* 土壤数据取自为 0~15cm 土层的测量数据 (data about soil means the soil status in 0~15cm layer)。

(2) 二次筛选 上述系统组成结构、功能和生境 3 方面的三级指标共有 43 项之多,它们之间很多具有明显的相互联系和补充作用,因此,为了体现指标选择综合性、代表性和实用性的原则,采用对浙江天童常绿阔叶林退化过程的研究数据进行了 2 次筛选。

具体采用的数学分析方法有:

主成分分析法 首先对各二级指标下的三级指标进行主成分分析,筛选出因子载荷量较大的指标。然

后对各一级指标下属的三级指标进行主成分分析,筛选出因子载荷量较大的指标。

无重复双因素方差分析 每次进行主成分分析后,要保证选出的三级指标  $F > F_{0.05}$ ,即各个三级指标组合起来在不同退化阶段间有显著差异。

根据分析得到常绿阔叶林生态系统退化的评价指标体系(图 1),评价指标体系共 13 项指标,其第一、第二主成分的累积贡献率达到了 92.548%,方差分析结果  $F$  值等于 8.667,大于  $F_{0.05}(2.368)$ 。

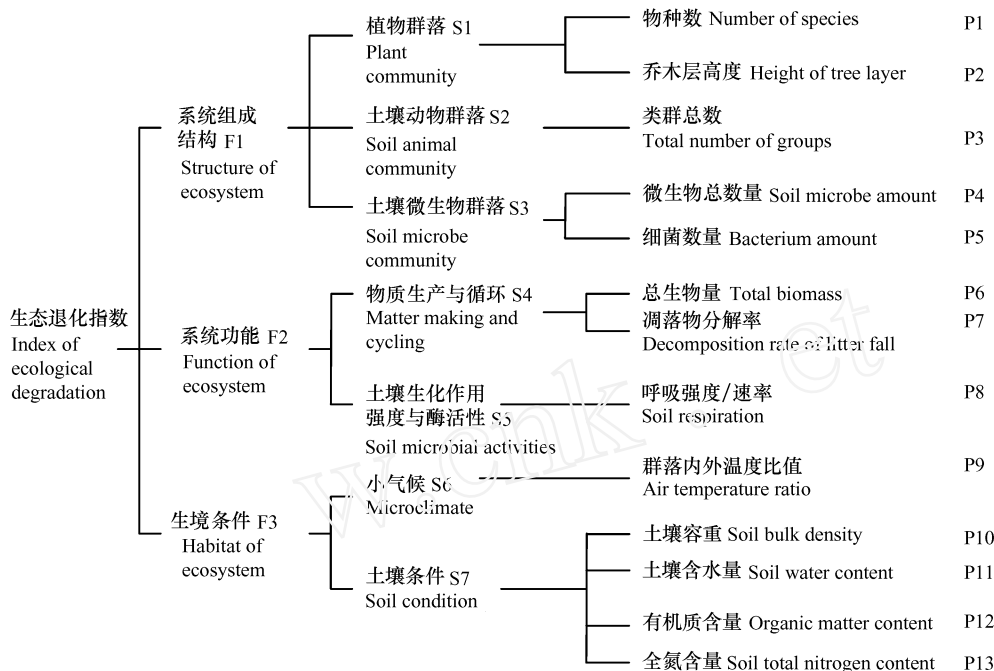


图 1 受损常绿阔叶林退化评价指标体系

Fig. 1 The index system of degradation assessment for damaged evergreen broad-leaved forest ecosystem

## 2 常绿阔叶林生态系统退化评价模型

### 2.1 数据的标准化及指标权重的确定

2.1.1 三级指标标准化及其相对权重的计算 三级指标值 ( $P_i$ ) 是退化评价指标体系的基础,其标准化采用极差法。根据指标在生态系统退化过程中的表现来确定其标准化的方法,随着退化程度的加剧指标值减小的标准化方法:

$$F(P_i) = \frac{P_{\max} - P_i}{P_{\max} - P_{\min}} \quad (1)$$

随着退化程度的加剧指标值增大的标准化方法:

$$F(P_i) = \frac{P_i - P_{\min}}{P_{\max} - P_{\min}} \quad (2)$$

式中,  $F(P_i)$  表示三级指标各因子的标准化值,  $i = 1, 2, \dots, 13$ ,  $P_i$  表示评价指标体系中各三级指标因子的实测值,  $P_{\max}$  和  $P_{\min}$  分别表示第  $i$  项评价指标因子在所有退化阶段中的最大值和最小值。

根据各评价指标在浙江天童常绿阔叶林不同退化阶段的研究数据,计算得到各三级指标因子的标准化值(表 2)。

指标权重的确定本文采用主成分分析法计算。在统计分析软件 SPSS 中对各二级指标下的三级指标因子标准化值进行主成分分析,以第一主成分分析的因子负荷量,采用层次分析法确定各三级指标因子在上一级指标中的作用大小,即相对权重。

2.1.2 二级指标值及其相对权重的计算 二级指标值 ( $S_i$ ) 是由其所属三级指标因子的标准化值乘以各自相对权重后加和得到。具体计算公式如下:

$$S_i = \sum_{j=1}^{i+n-1} F(P_j) \cdot RWP_j$$

(3)

式中,  $S_i$  为第  $i$  项二级指标数值,  $i = 1, 2, \dots, 7$ ,  $RWP_j$  为第  $j$  项三级指标因子的相对权重,  $n$  为该二级指标所包含三级指标的项数。对于  $i = 1, 2, \dots, 7$ , 有  $j = 1, 3, 4, 6, 8, 9, 10, n = 2, 1, 2, 2, 1, 1, 4$ 。

表 2 浙江天童受损常绿阔叶林不同退化阶段退化指标因子标准化值<sup>[22,24~27]</sup>

Table 2 Values of assessment indices and their standardized values in the different degraded series of damaged evergreen broad-leaved forest ecosystem<sup>[22,24~27]</sup>

| 二级指标<br>2nd level<br>indicator | 三级指标<br>3rd level<br>indicator            | 退化阶段 the series of degradation |                      |                             |                                   |                       |             |                 |
|--------------------------------|-------------------------------------------|--------------------------------|----------------------|-----------------------------|-----------------------------------|-----------------------|-------------|-----------------|
|                                |                                           |                                | 栲树林<br>C. fa. forest | 木荷林<br>P. ma.-S. su. forest | 马尾松 + 木荷林<br>S. su.-P. ma. forest | 马尾松林<br>P. ma. forest | 灌丛<br>Shrub | 裸地<br>Bare land |
| $S_1$                          | $P_1$                                     | A                              | 65.3                 | 42.8                        | 48                                | 37.8                  | 31.3        | 6               |
|                                |                                           | B                              | 0.0000               | 0.3794                      | 0.2917                            | 0.4637                | 0.5734      | 1.0000          |
|                                | $P_2$ (m)                                 | A                              | 20                   | 14                          | 11                                | 8                     | 0           | 0               |
|                                |                                           | B                              | 0.0000               | 0.3000                      | 0.4500                            | 0.6000                | 1.0000      | 1.0000          |
| $S_2$                          | $P_3$                                     | A                              | 27                   | 23                          | 24                                | 17                    | 22          | 8               |
|                                |                                           | B                              | 0.0000               | 0.2105                      | 0.1579                            | 0.5263                | 0.2632      | 1.0000          |
| $S_3$                          | $P_4$<br>( $\times 10^5$ cfu/g dny soil)  | A                              | 38.25                | 25.2                        | 13.15                             | 14.525                | 8.975       | 2.167           |
|                                |                                           | B                              | 0.0000               | 0.3617                      | 0.6956                            | 0.6575                | 0.8113      | 1.0000          |
|                                | $P_5$<br>( $\times 10^5$ cfu/g dry soil)  | A                              | 33.75                | 23.175                      | 9.6                               | 9.675                 | 7.25        | 1.967           |
|                                |                                           | B                              | 0.0000               | 0.3327                      | 0.7598                            | 0.7575                | 0.8338      | 1.0000          |
| $S_4$                          | $P_6$ (kg/m <sup>2</sup> )                | A                              | 22.6141              | 17.0906                     | 23.3732                           | 9.0808                | 2.0473      | 0               |
|                                |                                           | B                              | 0.0325               | 0.2688                      | 0.0000                            | 0.6115                | 0.9124      | 1.0000          |
|                                | $P_7$                                     | A                              | 0.49                 | 0.44                        | 0.35                              | 0.27                  | 0.13        | 0               |
|                                |                                           | B                              | 0.0000               | 0.1020                      | 0.2857                            | 0.4490                | 0.7347      | 1.0000          |
| $S_5$                          | $P_8$<br>(mg CO <sub>2</sub> /g dry soil) | A                              | 0.313                | 0.235                       | 0.23                              | 0.238                 | 0.205       | 0.137           |
|                                |                                           | B                              | 0.0000               | 0.4432                      | 0.4716                            | 0.4261                | 0.6136      | 1.0000          |
| $S_6$                          | $P_9$                                     | A                              | 0.957                | 1.013                       | 1.216                             | 1.059                 | 0.914       | 1               |
|                                |                                           | B                              | 0.1424               | 0.3278                      | 1.0000                            | 0.4801                | 0.0000      | 0.2848          |
| $S_7$                          | $P_{10}$ (g/cm <sup>3</sup> )             | A                              | 0.72                 | 0.95                        | 1.15                              | 1.16                  | 1.2         | 1.17            |
|                                |                                           | B                              | 0.0000               | 0.4792                      | 0.8958                            | 0.9167                | 1.0000      | 0.9375          |
|                                | $P_{11}$ (%)                              | A                              | 33.4                 | 29.1                        | 28.7                              | 28.3                  | 22.3        | 23.2            |
|                                |                                           | B                              | 0.0000               | 0.3874                      | 0.4234                            | 0.4595                | 1.0000      | 0.9189          |
|                                | $P_{12}$ (%)                              | A                              | 9.87                 | 3.35                        | 3.06                              | 3.84                  | 3.35        | 1.96            |
|                                |                                           | B                              | 0.0000               | 0.8243                      | 0.8609                            | 0.7623                | 0.8243      | 1.0000          |
|                                | $P_{13}$ (%)                              | A                              | 0.163                | 0.117                       | 0.105                             | 0.103                 | 0.092       | 0.065           |
|                                |                                           | B                              | 0.0000               | 0.4694                      | 0.5918                            | 0.6122                | 0.7245      | 1.0000          |

A 各评价指标的测定值 Values of the access factors; B 各评价指标的标准化值 standardized value of the access factors; C. fa. 栲树 *Castanopsis fargesii*; P. ma. 马尾松 *Pinus massoniana*; S. su. 木荷 *Schima superba*

同样采用主成分分析法确定二级指标的相对权重。

一级指标数值  $F_i$  及其权重以  $WF_i$  与二级指标同样的方法求得。

2.1.3 评价指标体系指标权重的计算 根据图 1 所示的层次结构,以及层次单排序的结果,用层次分析法进行层次总排序<sup>[28]</sup>,得到各级指标的权重(表 3)。

2.2 综合退化评价模式

在确定评价指标权重的基础上,构建常绿阔叶林生态系统退化综合评价模型:

王希华. 浙江天童常绿阔叶林退化过程中的植物群落. 课题总结报告,2005. 4  
易兰. 浙江天童受损常绿阔叶林的次生演替对土壤动物群落的影响. 上海:华东师范大学博士学位论文,2005  
路葵. 浙江天童常绿阔叶林退化过程中的土壤微生物和土壤酶活性. 课题总结报告,2005. 4

$$IED = \sum_{i=1}^n F(P_i) \cdot WP_i \quad (4)$$

式中,  $IED$  代表生态退化指数 (index of ecological degradation,  $IED$ ),  $F(P_i)$  是指三级指标的标准化值, 根据实测值由式 1、2 算得,  $WP_i$  是指三级指标权重, 具体取值见表 3。

### 2.3 退化评价等级和标准的确定

根据上述分析结果, 参照各种综合指数分组方法, 设计了一个受损常绿阔叶林生态系统退化评价的五级分级标准, 并给出了相应的分级评价 (表 4)。

### 3 评价模型的验证

为验证本研究提出的常绿阔叶林生态系统退化评价模型的有效性和适应性, 利用鼎湖山自然保护区不同演替阶段的研究数据对其进行了验证。

用表 5 中季风常绿阔叶林和裸地的数据作为模型中参数  $P_{\max}$  和  $P_{\min}$  的取值, 根据本模型得到两验证退化阶段——针阔叶混交林群落和马尾松林群落各评价指标的标准化值和生态退化指数值 (表 5)。其中针阔叶混交林的生态退化指数为 0.422, 对照受损常绿阔叶林生态系统退化程度分级表 (表 4), 属于退化级别 (0.18 ~ 0.52), 轻度退化; 马尾松林的生态退化指数为 0.590, 对照受损常绿阔叶林生态系统退化程度分级表属于退化级别 (0.52 ~ 0.59), 中度退化。两对象群落的退化程度验证结果完全符合参考退化阶段——针阔叶混交林和针叶林, 说明本评价模型用来评价常绿阔叶林生态系统的退化程度是适用和有效的。

表 4 受损常绿阔叶林生态系统退化程度分级标准

| Table 4 The classification criterion for evaluate the degradation degree of damaged evergreen broad-leaved forest ecosystem |                      |                              |                                         |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------|------------------------------|-----------------------------------------|
| 生态退化指数 $IED$<br>Index of ecological degradation                                                                             | 等级<br>Classification | 退化评价<br>Evaluation           | 参考退化阶段<br>Degradation stage             |
| > 0.75                                                                                                                      |                      | 极端退化 Extra-heavy degradation | 裸地 Bared land                           |
| 0.59 ~ 0.75                                                                                                                 |                      | 重度退化 Heavy degradation       | 灌草丛 Secondary shrub-grassland           |
| 0.52 ~ 0.59                                                                                                                 |                      | 中度退化 Medium degradation      | 针叶林 Needle-leaved forest                |
| 0.18 ~ 0.52                                                                                                                 |                      | 轻度退化 Slight degradation      | 针阔叶混交林 Needle-broad leaved mixed forest |
| < 0.18                                                                                                                      |                      | 正常 Normal                    | 常绿阔叶林 Evergreen broad-leaved forest     |

表 5 模型验证的数据源及验证结果<sup>[9,29~33]</sup>

| Table 5 Data for verify the model and the result of verification <sup>[9,29~33]</sup> |                 |            |              |            |                                   |                                 |
|---------------------------------------------------------------------------------------|-----------------|------------|--------------|------------|-----------------------------------|---------------------------------|
| 评价指标<br>Indicators                                                                    | 季风常绿阔叶林<br>MEBF | 裸地<br>BL   | 针阔叶混交林<br>MF | 马尾松林<br>PF | 针阔叶混交林标准化值<br>SV of indices in MF | 马尾松林标准化值<br>SV of indices in PF |
| $\ P_i$                                                                               | $P_{\max}$      | $P_{\min}$ | $P_{i1}$     | $P_{i2}$   | $F(P_{i1})$                       | $F(P_{i2})$                     |
| $P_1$                                                                                 | 137             | 0          | 72           | 53         | 0.6131                            | 0.4745                          |
| $P_2$                                                                                 | 18              | 0          | 15           | 8          | 0.5556                            | 0.1667                          |
| $P_3$                                                                                 | 21              | 14         | 20           | 16         | 0.7143                            | 0.1429                          |
| $P_4$                                                                                 | 4.02            | 0.44       | 4.14         | 7.04       | 0.0000                            | 0.4394                          |
| $P_5$                                                                                 | 2.950           | 0.090      | 2.559        | 3.119      | 0.0000                            | 0.1850                          |
| $P_6$                                                                                 | 380.67          | 0          | 261.00       | 64.01      | 0.8318                            | 0.3144                          |
| $P_7$                                                                                 | 0.50            | 0          | 0.20         | 0.13       | 0.7400                            | 0.6000                          |
| $P_8$                                                                                 | 477.9           | 377.9      | 435.4        | 429.5      | 0.4840                            | 0.4250                          |
| $P_9$                                                                                 | 0.919           | 1          | 0.987        | 0.999      | 0.9900                            | 0.8401                          |
| $P_{10}$                                                                              | 1.21            | 1.70       | 1.30         | 1.41       | 0.4082                            | 0.1837                          |
| $P_{11}$                                                                              | 38.57           | 11.23      | 25.97        | 24.90      | 0.5000                            | 0.4609                          |
| $P_{12}$                                                                              | 5.35            | 0.20       | 3.45         | 2.73       | 0.5087                            | 0.3689                          |
| $P_{13}$                                                                              | 0.19            | 0.02       | 0.10         | 0.09       | 0.5882                            | 0.5294                          |
|                                                                                       |                 | $IED$      |              |            | 0.422                             | 0.590                           |

MEBF: represents monsoon evergreen broad-leaved forest; BL: represents bared land; MF: represents broadleaf-pine mixed forest; PF: represents Pine forest; SV: represents standardized value

表 3 受损常绿阔叶林生态系统退化评价指标的权重值

Table 3 The weight of degradation assessment indicators of damaged evergreen broad-leaved forest ecosystem

| 一级指标<br>1st level<br>indicator | 权重 $WF_i$<br>Weight of<br>1st level<br>indicator | 二级指标<br>2nd level<br>indicator | 权重 $WS_i$<br>Weight of<br>2nd level<br>indicator | 三级指标<br>3rd level<br>indicator | 权重 $WP_i$<br>Weight of<br>3rd level<br>indicator |
|--------------------------------|--------------------------------------------------|--------------------------------|--------------------------------------------------|--------------------------------|--------------------------------------------------|
| $F_1$                          | 0.3699                                           | $S_1$                          | 0.1277                                           | $P_1$                          | 0.0639                                           |
|                                |                                                  | $S_2$                          | 0.1188                                           | $P_2$                          | 0.0639                                           |
|                                |                                                  | $S_3$                          | 0.1233                                           | $P_3$                          | 0.1188                                           |
| $F_2$                          | 0.3526                                           | $S_4$                          | 0.1763                                           | $P_4$                          | 0.0617                                           |
|                                |                                                  | $S_5$                          | 0.1763                                           | $P_5$                          | 0.0617                                           |
|                                |                                                  | $S_6$                          | 0.1388                                           | $P_6$                          | 0.0881                                           |
| $F_3$                          | 0.2775                                           | $S_7$                          | 0.1388                                           | $P_7$                          | 0.0881                                           |
|                                |                                                  |                                |                                                  | $P_8$                          | 0.1763                                           |
|                                |                                                  |                                |                                                  | $P_9$                          | 0.1388                                           |
|                                |                                                  |                                |                                                  | $P_{10}$                       | 0.0348                                           |
|                                |                                                  |                                |                                                  | $P_{11}$                       | 0.0336                                           |
|                                |                                                  |                                |                                                  | $P_{12}$                       | 0.0344                                           |
|                                |                                                  |                                |                                                  | $P_{13}$                       | 0.0359                                           |

#### 4 结论与讨论

森林生态系统在维持生物多样性和为区域乃至全球提供生态服务方面起着主要作用<sup>[34]</sup>,常绿阔叶林是湿润亚热带地区特有的生态系统类型,其分布区域是我国人口最密集的地区,人类活动历史悠久,尤其是近 20 多年的改革开放,经济发展迅速,但生态环境破坏的代价也十分巨大,各种退化过程并行存在,原生常绿阔叶林基本上不复存在,退化形成各种次生类型,导致抗干扰能力减弱,因此很容易继续逆行退化,这种逆行演替的局面甚至不存在外界干扰也很难逆转,最终到达裸地阶段。而作为该区域主要的自然生态系统类型,常绿阔叶林生态系统的退化,不仅表现为系统自身的功能衰退,而且也是其它生态环境恶化的根源<sup>[1]</sup>,将严重威胁着区域的生态安全,不利于区域的可持续发展。因此常绿阔叶林生态系统退化程度的诊断将对于我国广大亚热带地区常绿阔叶林生态系统的恢复重建具有重要意义。

建立一套能全面反映常绿阔叶林生态系统退化程度的评价指标体系和应用计算方法是一项基础性工作。定量评价结果的精确度和准确度,在很大程度上取决于选取的评价指标和确定的评价方法和标准的正确性。本研究得出的常绿阔叶林退化评价指标体系是在对浙江天童亚热带常绿阔叶林的研究基础之上,对 43 个备选指标的研究数据采用数学分析结合专家咨询的方法筛选出来的,减少了主观因素的干扰。各评价指标的取值来源于实际观察测定,与传统的评估指标的分级量值法相比其评价结果将更接近于实际情况。退化程度的评价模型采用的是基于主成分分析赋权的综合指数法,该方法能体现生态系统的综合性、整体性和层次性,且易于理解和计算,最后得到的综合评价结果简洁直观,能综合反映系统整合原理。

亚热带常绿阔叶林生态系统分布广泛,退化的类型有结构受损类型、景观受损类型以及两者的复合类型<sup>[7]</sup>,受损后退化的生态系统更是多种多样。本文提出的退化指标体系主要针对是结构受损类型,而且主要依据是在中国东部,特别是浙江常绿阔叶林的研究结果,虽然通过用广东鼎湖山南亚热带的数据进行验证,表明其适用性和有效性,但是由于亚热带常绿阔叶林的复杂性,本文所提出的评价指标体系以及评价模型还需进行多方面实际验证,加以修改充实。对于景观受损类型的退化评价,有必要利用遥感分析的方法从区域尺度上分析不同退化程度生态系统的空间分布状况及其生态学过程,同时深入研究各评价指标在不同退化阶段的阈值。

#### References:

- [1] Liu G H, Fu B J, Chen L D, *et al.* Characteristics and distributions of degraded ecological types in China. *Acta Ecologica Sinica*, 2000, 20(1): 13 ~ 19.
- [2] Du X J, Gao X M, Ma K P. Diagnosis of the degree of degradation of an ecosystem: the basis and precondition of ecological restoration. *Acta Phytocologica Sinica*, 2003, 27(5): 700 ~ 708.
- [3] Platt R B. Conference summary. In: Carins Jr J, Dickson K L, Herricks E E eds. *Recovery and restoration of damaged ecosystems*. Charlottesville: University Press of Virginia, 1977.
- [4] Kang L. Restoration and reconstruction of ecosystem. In: Ma S J ed. *Perspective of modern ecology*. Beijing: Science Press, 1990. 300 ~ 308.
- [5] Bao W K, Chen Q H, Liu Z G. Restoration and enhancement of biological diversity in degraded mountainous ecosystem. In: Biodiversity Committee, the Chinese Academy of Sciences & Department for Wildlife and Forest Plants Protection, the Ministry of Forestry eds. *Advances in biodiversity research*. Beijing: Chinese Science and Technology Press, 1995. 417 ~ 422.
- [6] Hobbs R J, Norton D A. Towards a conceptual framework for restoration ecology. *Restoration Ecology*, 1996, 4: 93 ~ 110.
- [7] Chen X Y, Song Y C. Types of damaged ecosystems and the critical factors leading to degradation. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2004, 13(1): 78 ~ 83.
- [8] Li B. The range land degradation in North China and its prevention strategy. *Scientia Agricultura Sinica*, 1997, 30(6): 1 ~ 9.
- [9] Yu Z Y, Peng S L, eds. *Ecological studies on vegetation rehabilitation of tropical and subtropical degraded ecosystem*. Guangzhou: Guangzhou Science and Technology Press, 1996.
- [10] Tanser F C, Palmer A R. The application of a remotely-sensed diversity index to monitor degradation patterns in a semi-arid, heterogeneous, South African landscape. *Journal of Arid Environments*, 1999, 43: 477 ~ 484.
- [11] Oba G, Kötire D G. Assessments of landscape level degradation in southern Ethiopia: pastoralists versus ecologists. *Land Degradation and Development*, 2001, 12: 461 ~ 475.
- [12] Sonneveld B G J. Formalizing expert judgments in land degradation assessment: a case study for Ethiopia. *Land degradation and development*, 2003, 14: 347 ~ 361.
- [13] Zuquette L V, Pejon O J, dos Santos Collares J Q. Land degradation assessment based on environmental geo-indicators in the Fortaleza metropolitan region, state of Ceara: Brazil. *Environmental Geology*, 2004, 45: 408 ~ 425.
- [14] Shrestha D P, Zinck J A, Van Ranst E. Modelling land degradation in the Nepalese Himalaya. *Catena*, 2004, 57: 135 ~ 156.

- [15] Zhang J E, Xu Q. The diagnostic features of degraded ecosystem and index for degradation evaluation. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 1999, 8(2):215~220.
- [16] van Dam R A, Camilleri C, Finlayson C M. The potential of rapid assessment techniques as early warning Indicators of wetland degradation: a review. *Environmental Toxicology and Water Quality*, 1998, 13(4):297~312.
- [17] Stasyuk N V, Dobrovolskii G V, Zalibekov Z G. Assessment of soil cover degradation and desertification in northern lowland Dagestan. *Russian Journal of Ecology*, 2004, 35(3):144~149.
- [18] Mirtskhulava T E. Assessment of the critical state of erodible soils and the risk of soil degradation from erosion. *Eurasian Soil Science*, 2005, 38(10):1120~1124.
- [19] Eftemeijer P L A. A new technique for rapid assessment of mangrove degradation: a case study of shrimp farm encroachment in Thailand. *Trees*, 2002, 16:204~208.
- [20] Du X J, Jiang F Q, Shen H, *et al.* Quantitative measurement on degradation degree of ecosystem in hilly region of western Liaoning Province. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2001, 12(1):156~158.
- [21] Badea O, Tanase M, Georgeta J. Forest health status in the Carpathian Mountains over the period 1997—2001. *Environmental Pollution*, 2004, 130:93~98.
- [22] Song Y C, Wang X R eds. *Vegetation and flora of Tiantong national forest park Zhejiang Province*. Shanghai: Publishing house of Shanghai Science and Technology, 1995.
- [23] Zhao X Y, Chen H S, Sun C Q eds. *Restoration ecology: principles and approaches of ecological restoration*. Beijing: China Environmental Science Press, 2001.
- [24] Zhang Q F, You W H, Song Y C. Influence of plant community succession on soil physical properties in Tiantong forest park, Zhejiang Province. *Journal of Plant Resources and Environment*, 1997, 6(2):36~40.
- [25] Zhang Q H, Song Y C, Wu H Q, *et al.* Dynamics of litter amount and its decomposition in different successional stages of evergreen broad-leaved forest in Tiantong. Zhejiang Province. *Acta Phytocologica Sinica*, 1999, 23(3):250~255.
- [26] Zhang Q F, You W H, Song Y C. Effect of plant community succession on soil chemical properties in Tiantong, Zhejiang Province. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 1999, 10(1):19~22.
- [27] Zhang Q H, You W H, Song Y C. Relationship between plant community secondary succession and soil fertility in Tiantong, Zhejiang Province. *Acta Ecologica Sinica*, 1999, 19(2):174~178.
- [28] Xu J H ed. *Mathematical methods in contemporary geography*. Beijing: Higher Education Press, 2002.
- [29] Huang Z L, Kong G H, Wei P. Plant species diversity dynamics in Dinghu Mountain forests. *Chinese Biodiversity*, 1998, 6(2):116~121.
- [30] Mo J M, Peng S L, Sandra Brown, *et al.* Response of biomass production to human impacts in a pine forest in subtropical China. *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24(2):193~200.
- [31] Mo J M, Xue J H, Fang Y T. Litter decomposition and its responses to simulated N deposition for the major plants of Dinghushan forests in subtropical China. *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24(7):1413~1420.
- [32] Yi Z G, Yi W M, Zhou G Y, *et al.* Soil carbon effluxes of three major vegetation types in Dinghushan Biosphere Reserve. *Acta Ecologica Sinica*, 2003, 23(8):1673~1678.
- [33] Li D J, Mo J M, Fang Y T, *et al.* Study on availability of micronutrients in soils under three different forests of Dinghushan Nature Reserve. *Guizhou*, 2004, 24(6):529~534.
- [34] Ozanne C M P, Anhuif D, Boulter S L, *Biodiversity Meets the Atmosphere: A Global View of Forest Canopies*. *Science*, 2003, 5630(301):183~186.

## 参考文献:

- [1] 刘国华,傅伯杰,陈利顶,等. 中国生态退化的主要类型、特征及分布. *生态学报*, 2000, 20(1):13~19.
- [2] 杜晓军,高贤明,马克平. 生态系统退化程度的诊断:生态恢复的基础和前提. *植物生态学报*, 2003, 27(5):700~708.
- [4] 康乐. 生态系统的恢复与重建. 见:马世骏主编, *现代生态学透视*. 北京:科学出版社, 1990. 300~308.
- [5] 包维楷,陈庆恒,刘照光. 山地退化生态系统中生物多样性恢复与重建研究. 见:中国科学院生物多样性委员会、林业部野生动物和森林植物保护司主编, *生物多样性研究进展*. 北京:中国科学技术出版社, 1995. 417~422.
- [7] 陈小勇,宋永昌. 受损生态系统类型及影响其退化的关键因素. *长江流域资源与环境*, 2004, 13(1):78~83.
- [8] 李博. 中国北方草地退化及防治对策. *中国农业科学*, 1997, 30(6):1~9.
- [9] 余作岳,彭少麟主编. *热带亚热带退化生态系统植被恢复生态学*. 广州:广东科学技术出版社, 1996.
- [15] 章家恩,徐琪. 退化生态系统的诊断特征及其评价指标体系. *长江流域资源与环境*, 1999, 8(2):215~220.
- [20] 杜晓军,姜凤岐,沈慧,等. 辽西低山丘陵区生态系统退化程度的定量确定. *应用生态学报*, 2001, 12(1):156~158.
- [22] 宋永昌,王祥荣主编. *浙江天童国家森林公园的植被和区系*. 上海:上海科学技术文献出版社, 1995.
- [23] 赵晓英,陈怀顺,孙成权主编. *恢复生态学:生态恢复的原理与方法*. 北京:中国环境科学出版社, 2001.
- [24] 张庆费,由文辉,宋永昌. 浙江天童植物群落演替对土壤物理性质的影响. *植物资源与环境*, 1997, 6(2):36~40.
- [25] 张庆费,宋永昌,吴化前,等. 浙江天童常绿阔叶林演替过程凋落物数量及分解动态. *植物生态学报*, 1999, 23(3):250~255.
- [26] 张庆费,由文辉,宋永昌. 浙江天童植物群落演替对土壤化学性质的影响. *应用生态学报*, 1999, 10(1):19~22.
- [27] 张庆费,由文辉,宋永昌. 浙江天童群落次生演替对土壤肥力的关系. *生态学报*, 1999, 19(2):174~178.
- [28] 徐建华. *现代地理学中的数学方法*. 北京:高等教育出版社, 2002.
- [29] 黄忠良,孔国辉,魏平. 鼎湖山植物物种多样性动态. *生物多样性*, 1998, 6(2):116~121.
- [30] 莫江明,彭少麟, Sandra Brown, 等. 鼎湖山马尾松林群落生物量生产对人为干扰的响应. *生态学报*, 2004, 24(2):193~200.
- [31] 莫江明,薛璟花,方运霆. 鼎湖山主要森林植物凋落物分解及其对 N 沉降的响应. *生态学报*, 2004, 24(7):1413~1420.
- [32] 易志刚,蚁伟民,周国逸,等. 鼎湖山三种主要植被类型土壤碳排放研究. *生态学报*, 2003, 23(8):1673~1678.
- [33] 李德军,莫江明,方运霆,等. 鼎湖山自然保护区不同演替阶段森林土壤中有效微量元素状况研究. *广西植物*, 2004, 24(6):529~534.