

应用投影寻踪分类技术的森林生态功能评价

张 瑜, 陈存友, 胡希军

(中南林业科技大学 风景园林学院, 湖南 长沙 410001)

摘要:【目的】合理评价森林生态功能, 为制定提升森林生态功能相应措施提供依据。【方法】以广东南雄观音寨自然保护区为例, 选取与森林生态功能相关的 19 项指标, 通过投影寻踪分类法构建森林生态功能评价体系。【结果】①保护区中“较优”等级森林占据明显优势, 但保护区整体评级为“中”。②保护区森林结构整体较好, 但竹林多, 幼龄林较多, 森林蓄积能力、自然度较弱。③19 项评价指标中, 郁闭度、枯枝落叶厚度、公顷株数、平均高、总覆盖度是极重要指标; 坡位、自然度、海拔、龄组、土层厚度、森林群落结构、平均胸径、坡向是一般重要指标; 公顷生物量、公顷蓄积量、树种结构、健康度、坡度、土壤类型是不重要指标。【结论】针对各个评价等级的森林, 建议如下: ①对“优”和“较优”等级森林进行监测与保护; “中”等级森林需寻找得分较差原因, 对症保护, 进行重点监测; “差”和“较差”等级森林进行封山抚育。②适当控制竹林的生长范围。③根据评价结果适当调整保护区功能。图 1 表 6 参 22

关键词: 森林经理学; 森林生态功能评价; 投影寻踪分类; 评价体系; 森林特征; 观音寨自然保护区

中图分类号: S771.8 文献标志码: A 文章编号: 2095-0756(2020)02-0243-08

Evaluation of forest ecological function based on projection pursuit classification

ZHANG Yu, CHEN Cunyou, HU Xijun

(College of Landscape Architecture, Central South University of Forestry Science and Technology, Changsha 410001, Hunan, China)

Abstract: [Objective] The rational evaluation of forest ecological function can provide basis for formulating the corresponding measures to improve the ecological function of forests, [Method] Taking Guanyindong Nature Reserve in Nanxiong, Guangdong Province as an example, 19 indicators related to forest ecological function were selected and a forest ecological function evaluation system was established by projection pursuit classification. [Result] (1) The relatively excellent grade forest in the reserve occupied an obvious advantage, but the overall rating of the reserve was medium. (2) The forest structure in the reserve is generally good, but there are too many bamboo forests and young trees, which caused weak forest accumulation capacity and low degree of naturalness. (3) Canopy density, litter thickness, number of trees per hectare, average height and total coverage belonging to 19 indicators in the evaluation process are extremely important. Slope position, naturalness, elevation, age group, soil layer thickness, forest community structure, average DBH, and slope direction are generally important. And hectare biomass, hectare accumulation, tree species structure, health, slope, and soil type are not so important. [Conclusion] Suggestions by the preceding evaluation grade are as follows: (1) Monitoring and protecting should be implemented in the excellent and relatively excellent grade forests. Finding the symp-

收稿日期: 2019-03-25; 修回日期: 2019-09-19

基金项目: 湖南省教育厅科学研究项目(13C1135); 国家林业局风景园林学重点学科资助项目(林人发[2016]21号)

作者简介: 张瑜, 从事景观规划与生态修复研究。E-mail: zhangyu12177@163.com。通信作者: 陈存友, 副教授, 博士, 国家注册规划师, 从事风景园林规划与设计、城乡发展、旅游规划研究。E-mail: chen-cunyou@163.com

omatic reasons, monitoring and protecting the medium grade forests emphatically. Poor and relatively poor grade forests should be closed hillsides to facilitate afforestation. (2) The reserve should control the growth and expansion of bamboo forests. (3) The functional zoning of protected areas can be adjusted appropriately according to the evaluation results. [Ch, 1 fig. 6 tab. 22 ref.]

Key words: forest management; forest ecological function evaluation; projection pursuit classification; evaluation system; forest characteristics; Guanyindong Nature Reserve

随着生态环境的不断恶化,提升生态功能、保障国家生态安全已日益迫切。合理评价森林生态功能,为提升森林生态功能制定相应措施提供科学依据,是当前林业建设的一项重要工作。以《国家森林资源连续清查技术规定(2004)》中制定的评价方法^[1]为依据,当前森林生态功能的研究主要有3个热点。一是森林生态功能评价的出发点和评价角度。如郭玉文等^[2]参考了日本林野厅对于森林生态功能的评价方式,提出通过影子价格^[3]估算森林生态功能价值。赖兴会^[4]认为生态公益林生态功能评价应当首先根据不同森林的主导功能作用制定评价标准和评价指标。二是将现有的评价方式与其他评价体系融合。如刘延飞^[5]将现有评价体系与林地自然度、森林健康等内容进行结合,共同评价。三是对现有评价方式的指标、指标赋值、数据处理方式、权重确定、评价角度等进行修正和增补。如尉卫平^[6]采用因子分析法、层次分析法重新确定了评价因子的权重。施恭明等^[7]引入了投影寻踪技术构建森林生态功能评价模型,但缺乏对评价结果准确性的验证。不同地区森林特征不同,所构建的评价体系也不同;较其他方法而言,使用投影寻踪技术进行森林生态功能评价准确度更高。本研究以广东省南雄市观音寨自然保护区为例,选择19项评价指标,运用投影寻踪分类法构建森林生态功能评价体系,分析保护区林地特征,为观音寨自然保护区功能区划分、保护与发展提出相应建议,同时为今后森林生态功能评价工作提供新的思路。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

研究区位于广东省南雄市百顺镇东南部,主要保护对象为亚热带常绿阔叶林等次生植被,以伯乐树 *Bretschneidera sinensis* 为主要保护对象的亚热带典型森林生态群落,以伯乐树、金毛狗 *Cibotium barometz*、福建柏 *Fokienia hodginsii* 和金斑喙凤蝶 *Teinopalpus aureus*、豹猫 *Felis bengalensis*、虎纹蛙 *Rana tigrina*、蛇雕 *Spilornis cheela* 等为代表的国家重点保护珍稀濒危野生动植物及其生境。总面积为 2 885.54 hm²,其中非林地 74.47 hm²,有林地 2 811.04 hm²。

1.2 数据来源

所用数据来自南雄市林业局提供的2017年二类调查数据,自然保护区范围带有小班数据的1:10 000地形图,谷歌地图下载的遥感影像图。在综合科学考察报告的基础上,对观音寨自然保护区植被类型、重点保护对象的类型及分布进行实地调研。

1.3 研究区域植被类型

根据《中国植被》^[8]的分类原则和分类单位,以“群落学—生态学”为原则,对保护区植物的种类组成、外貌结构、生活型、建群种类、生态地理特征和动态特征进行调查并统计分析^[9]。依据《国家森林资源连续清查技术规定(2014)》,观音寨自然保护区植被按照其树种蓄积情况可划分为7个树种结构(表1)。

表1 树种结构面积及占比

Table 1 Structural area and proportion of tree species

树种结构	面积/hm ²	面积占比/%	树种结构	面积/hm ²	面积占比/%
针叶纯林	98.69	3.5	针叶混交林	33.42	1.2
阔叶纯林	813.51	28.9	针阔叶混交林	250.50	8.9
针叶相对纯林	44.33	1.6	竹林	1 163.47	41.4
阔叶相对纯林	407.15	14.5	总计	2 811.04	100.0

2 研究方法

2.1 评价体系建立

2.1.1 指标选取 森林生态系统功能具有较强的综合性，单个功能的研究往往会忽略生态系统各个功能之间的权衡，限制人们对多样性影响生态系统功能的理解^[10]。因此，本研究从决定森林生态功能的森林结构^[11]角度出发，以《国家森林资源连续清查技术规定(2014)》中的森林生态功能评价指标为基础，查阅立地条件^[12]、森林结构^[13]等相关文献，选取与森林生态功能相关的 2 个方面，共 19 项评价指标(表 2)。

表 2 森林生态功能评价指标一览表

Table 2 List of evaluation indicators of forest ecological function

一级指标	二级指标	三级指标
立地条件	地形与土壤	坡度、坡位、坡向、海拔、枯枝落叶厚度、土壤类型、土壤厚度
森林结构	组成结构	树种结构
	个体特征	平均胸径、平均树高
	年龄结构	龄组
	空间结构	水平：郁闭度、总覆盖度、公顷株数；垂直：森林群落结构
	总体结构	健康度、自然度、公顷生物量、公顷蓄积量

2.1.2 定性指标等级划分 定量指标可直接用于计算，定性指标需要一定方式进行量化。根据《国家森林资源连续清查技术规定(2014)》、文献[14]及观音寨自然保护区的现状情况，研究区森林生态功能的等级划分与赋值如表 3 所示。

表 3 森林生态功能评价指标分级及赋值表

Table 3 Classification and apportionment table of forest ecological function evaluation indicators

评价因子	立地条件			森林结构					
	坡向	坡位	坡度	土壤类型	龄组	树种结构	群落结构	健康度	自然度
类型 1	北坡、西北坡(293°~22°)	脊部	险坡(≥46°)	-	幼龄林	针叶纯林	简单	-	5
划分 2	西坡、东北坡(248°~292°, 23°~67°)	上坡	急坡(36°~45°)	-	中龄林	阔叶纯林、竹林	-	较健康	4
标准 3	无坡向(坡度<5°)	全坡	陡坡(26°~35°)	红壤	近熟林	针叶相对纯林	较完整	健康	3
及赋 4	东坡、西南坡(68°~112°, 203°~247°)	中坡	斜坡(16°~25°)	-	成熟林	阔叶相对纯林	-	-	2
值 5	南坡、东南坡(113°~202°)	下坡	平坡(0~5°)	-	过熟林	针叶混交林、针阔混交林	完整	-	1

说明：由于各个评价因子在等级划分过程中存在级数差异，部分分值未存在对应等级，用“-”表示

2.2 投影寻踪分类技术

2.2.1 投影寻踪分类技术原理 投影寻踪分类法(PPC 法)^[15]是指在未知指标权重系数的情况下，通过将高维数据投影到低维(1~3 维)的子空间上，采用投影指标函数分析投影构形，衡量投影暴露某种结构的可能性大小，寻找能够使投影指标函数达到最优(即能反映高维数据结构或特征)的投影值，得出指标权重系数，分析高维数据的结构特征。具体算法如下。①样本评价指标集数据的归一化处理。评价指标量纲不同，数据分布也各不相同。计算之前需采用极值归一法对评价指标的数据进行无量纲化处理：

$$y_{ij} = [x_{ij} - x_{j\min}] / [x_{j\max} - x_{j\min}], \text{ 越大越优;} \quad (1)$$

$$y_{ij} = [x_{j\max} - x_{ij}] / [x_{j\max} - x_{j\min}], \text{ 越小越优。} \quad (2)$$

式(1)~(2)中： $x_{j\max}$ 、 $x_{j\min}$ 分别表示样本数据集中第 j 个指标的最大值和最小值， $y_{ij}(i=1-n, j=1-p)$ 为标准化的数据样本值。②构造投影指标函数。投影寻踪方法就是把 p 维数据 $y_{ij}(i=1-n, j=1-p)$ 综合成以 $a=(a_1, a_2, \dots, a_p)$ 为投影方向的一维投影值 Z_i ：

$$Z_i = \sum_{j=1}^p a(j)y_{ij}, \quad i=1, 2, \dots, n. \quad (3)$$

式(3)中: a 为单位长度向量, 且 $a(j) > 0$, $\sum_{j=1}^p a^2(j) = 1$ 。由此可以得到 $Z_i(i=1-n)$ 一维散布图。一维散布图是进行数据分级的基础。数据分级的过程要求满足投影值 $Z_i(i=1-n)$ (在散布时局部投影点尽可能密集, 最好能够凝聚成若干点团, 但是整体上投影点团之间尽可能散开的条件)。为此, 投影指标函数可构造为:

$$Q(a) = S_Z D_Z; \quad (4)$$

$$S_Z = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Z(i) - \bar{Z})^2}{n-1}}; \quad (5)$$

$$D_Z = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n (R - r_{ij}) u(R - r_{ij}). \quad (6)$$

式(4)~(5)中: S_Z 为投影值 Z_i 的标准差, D_Z 为投影值 Z_i 的局部密度, \bar{Z} 为 $Z_i(i=1-n)$ 的平均值, $u(R - r_{ij})$ 为单位阶跃函数, 当 $R - r_{ij} \geq 0$ 时其函数值为 1, 而当 $R - r_{ij} < 0$ 时其函数值为 0。 R 为局部密度的窗口半径, $r_{ij} = |Z(i) - Z(j)|$, 表示 $Z(i)$ 与 $Z(j)$ 之间的距离。熊聘等^[16-17]在研究中指出, R 的取值在 $r_{\max}/5 \sim r_{\max}/3$ 范围内是合理的。因此, 本次评价 R 取值 $r_{\max}/5$ 。③优化投影指标函数。为了能够最大化暴露高维度数据中某一特征结构的投影方向, 可以选择求解投影指标函数的最大值。即:

$$\max Q(a^*) = S_Z D_Z. \quad (7)$$

其约束条件为:

$$\text{s.t. } \sum_{j=1}^p a^2(j) = 1, \quad a(j) \in [0, 1]. \quad (8)$$

本次寻优求解以 MATLAB 为运算平台, 选用群智能最优化算法中基于混沌的人工蜂群算法^[18]进行择优。在式(7)中求得最佳投影方向 a^* 后, 将其代入式(3)进行运算, 便可以得到各个样本数据的投影值 $Z^*(i)$ 。

2.2.2 投影寻踪分类技术的运用 投影寻踪分类法对于样本数据计算得出的最佳向量 a^* 即为评价体系的权重; 通过分析权重大小, 可得到一定的林地特征。计算所得的 $Z^*(i)$ 与 $Z^*(j)$ 越相近, 代表两者越趋向于同一类, 以此为依据可以对样本聚类。本次评价中, 计算所得投影值 $Z^*(i)$ 聚类的结果即为评价结果。

2.3 评价结果等级划分

根据投影值 Z_i 的特征, 结合 ArcGIS 自然间断点法^[19-20]划分本次评价结果等级。单位面积得分(T)为:

$$T = \frac{\sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^n W_i X_i}{A}. \quad (9)$$

式(9)中: j 为小班数量, i 为指标数, W_i 为指标权重, X_i 为指标得分, A 为目标计算区域的面积(单位为 m^2)。

3 结果与分析

3.1 权重分析

3.1.1 权重结果 表 4 为计算所得的森林生态功能的指标权重。结合楼文高等^[21]提出的投影寻踪分类模型构建后权重最优解的五大特征发现: 本次计算中的常数项 X_7 , 计算得到的向量接近于 0; 指标的权重值大部分大于 0.1。仅将 $X_{10} \sim X_{19}$ 等 10 个变量的归一化处理方式由式(1)变为式(2)后再次进行计算, 结果发现: 2 次计算结果互为相反数。说明本次计算的结果是最优解。楼文高等^[21]也指出, 如果在投影寻踪分类法的计算下为最优解, 则其相反数也为最优解, 因此本次计算所得权重可全部取其绝对值, 即本次综合评价模型可描述为:

$$Y = Z^*(i) = Y_1 + Y_2 + Y_3 + Y_4 + Y_5 + Y_6. \quad (10)$$

式(10)中: 立地条件 Y_1 、组成结构 Y_2 、个体结构 Y_3 、年龄结构 Y_4 、空间结构 Y_5 、总体结构 Y_6 的计算方式分别为:

$$Y_1 = 0.121X_1 + 0.274X_2 + 0.004X_3 + 0.257X_4 + 0.366X_5 + 0.213X_6 + 0.001X_7; \quad (11)$$

$$Y_2 = 0.041X_{15}; \quad (12)$$

$$Y_3=0.134X_{12}+0.329X_{13}; \quad (13)$$

$$Y_4=0.226X_8; \quad (14)$$

$$Y_5=0.396X_9+0.320X_{10}+0.354X_{11}+0.136X_{16}; \quad (15)$$

$$Y_6=0.044X_{14}+0.030X_{17}+0.271X_{18}+0.083X_{19}。 \quad (16)$$

计算得到 $r_{\max}=2.492\ 73$ ，因此 R 取值 $0.498\ 546$ 。投影值 Z_i 的标准差 $S_Z=0.282\ 248$ ，投影值 Z_i 的局部密度 $D_Z=29\ 753.7$ ，投影指标函数 $Q_i=8\ 397.94$ 。

表 4 森林生态功能评价指标权重表

Table 4 Weight table of forest ecological function evaluation indicators

变量	变量名称	向量结果	改变 $X_{10}-X_{19}$ 归一化方式后	指标权重	变量	变量名称	向量结果	改变 $X_{10}-X_{19}$ 归一化方式后	指标权重
X_1	坡向	0.121	0.119	0.121	X_{11}	公顷株数	0.354	-0.355	0.354
X_2	坡位	0.274	0.273	0.274	X_{12}	平均胸径	0.134	-0.134	0.134
X_3	坡度	-0.004	-0.004	0.004	X_{13}	平均林高	0.329	-0.329	0.329
X_4	海拔	-0.257	-0.257	0.257	X_{14}	公顷蓄积量	0.044	-0.044	0.044
X_5	枯枝落叶厚度	0.366	0.365	0.366	X_{15}	树种结构	-0.041	0.039	0.041
X_6	土层厚度	-0.213	-0.212	0.213	X_{16}	森林群落结构	0.136	-0.137	0.136
X_7	土壤类型	0.001	-0.001	0.001	X_{17}	健康度	0.030	-0.030	0.030
X_8	龄组	0.226	0.226	0.226	X_{18}	自然度	0.271	-0.271	0.271
X_9	郁闭度	0.396	0.396	0.396	X_{19}	公顷生物量	0.083	-0.083	0.083
X_{10}	总覆盖度	0.320	-0.321	0.320					

3.1.2 权重分析 ①影响观音寨自然保护区森林生态功能的指标重要性排序。投影寻踪分类法中权重的绝对值代表了该项指标在所有筛选出的指标中的重要性程度，以此为依据可以对筛选出的指标进行排序。其结果为：郁闭度>枯枝落叶厚度>公顷株数>平均高>总覆盖度>坡位>自然度>海拔>龄组>土层厚度>森林群落结构>平均胸径>坡向>公顷生物量>公顷蓄积量>树种结构>健康度>坡度>土壤类型。其中郁闭度、枯枝落叶厚度、公顷株数、平均高、总覆盖度极重要，坡位、自然度、海拔、龄组、土层厚度、森林群落结构、平均胸径、坡向一般重要，公顷生物量、公顷蓄积量、树种结构、健康度、坡度、土壤类型不重要。②指标的影响方式。19个指标中有15个指标的向量为正值，说明这15个指标与保护区的森林生态功能呈现正向相关关系。坡度、海拔、土层厚度、树种结构这4个指标的权重为负值，除“海拔”项为逆向指标(越小越好)外，其他3项均为正向指标(越大越好)。“坡度”项作为定性指标，量化后变化为了正向指标。为验证这4项指标与其他指标之间负相关关系的正确性，以SPSS 17.0为计算平台，对数据进行了相关性分析(表5)。可以看出：4个指标与体系中的其他指标的数据呈显著的负相关关系，与指标权重计算结果一致；说明研究区林地立地条件较好，森林结构较好的位置坡度较大，土层厚度较小，树种以竹林或阔叶纯林等低分段树种组成为主，即观音寨自然保护区中的低分段树种(竹林或阔叶纯林)森林结构较好。

3.2 森林生态功能评价

3.2.1 评价结果分析 以地籍号为媒介，通过使用 ArcGIS 将样本投影值 Y 与观音寨自然保护区的小班信息进行整合，得到研究区森林生态功能评价结果(图1)；统计计算得到观音寨自然保护区中各个等级的森林面积与面积占比(表6)。代入式(10)，计算可知观音寨自然保护区的总体森林生态功能单位面积得分为 1.759，评价等级为“中”；与实地情况基本吻合。由表6可以看出：研究区中“较优”等级森林的面积占比最大，且斑块分布均匀，说明“较优”等级森林占据明显优势；但是保护区的整体评级为“中”，说明“较差”和“差”等级森林对其影响较大，需加大经营力度。

3.2.2 林地特征分析 对各个等级森林的特征分析可知：评价为“优”的森林以非林地附近、立地条件较好的中龄高密度竹林为主。评价为“较优”的森林大多为立地条件较好、森林结构较为完整、中龄或近熟的纯天然阔叶林或针叶混交林。评价为“中”的森林大多也为纯天然阔叶林、针叶混交林或针阔混交林。相比“较优”等级森林，其立地条件略差，森林结构相对较简单，树龄以幼龄为主。“较优”

表5 森林生态功能评价指标相关性分析表

Table 5 Relevance analysis table of forest ecological function evaluation indicators

变量	坡度		海拔		土层厚度		树种结构	
	Pearson 相关	显著性	Pearson 相关	显著性	Pearson 相关	显著性	Pearson 相关	显著性
坡向	0.053	0.335	-0.094	0.091	-0.189**	0.001	0.210**	0.000
坡位	-0.054	0.329	-0.514**	0.000	-0.099	0.074	-0.068	0.221
坡度	1		0.003	0.958	0.055	0.322	-0.083	0.130
海拔	0.003	0.958	1		0.070	0.205	0.152**	0.006
枯枝落叶厚	-0.045	0.413	0.049	0.379	-0.207**	0.000	0.316**	0.000
土层厚度	0.055	0.322	0.070	0.205	1		0.013	0.819
龄组	0.011	0.847	-0.077	0.163	-0.103	0.063	0.036	0.510
郁闭度	0.010	0.859	-0.402**	0.000	-0.060	0.276	-0.047	0.394
总覆盖度	0.109*	0.048	-0.163**	0.003	-0.020	0.721	-0.046	0.404
公顷株数	0.086	0.121	-0.519**	0.000	-0.239**	0.000	-0.364**	0.000
平均胸径	-0.140*	0.011	0.304**	0.000	0.102	0.063	0.480**	0.000
平均高	0.011	0.836	-0.428**	0.000	0.098	0.075	-0.231**	0.000
公顷蓄积	-0.075	0.172	-0.128*	0.020	0.186**	0.001	0.074	0.181
树种结构	-0.083	0.130	0.152**	0.006	0.013	0.819	1	
森林群落结构	0.044	0.424	0.202**	0.000	-0.107	0.052	0.344**	0.000
健康度	-0.003	0.951	0.007	0.903	-0.110*	0.045	-0.172**	0.002
自然度	-0.076	0.169	0.353**	0.000	-0.235**	0.000	0.160**	0.004
公顷生物量	-0.076	0.171	0.031	0.572	-0.009	0.868	0.327**	0.000

说明：**表示在0.01上显著相关 *表示在0.05上显著相关

“中”等级的森林基本包含了观音寨自然保护区主要保护的次生植被和森林生态群落主体。评价为“较差”的森林以远离非林地密集处的幼龄竹林为主。以竹林本身的生长特征及植物特征而言，其蓄积量、森林生态功能的发挥并不足以达到“优”等级，但在此次评价过程中，“优”等森林基本以竹林为主。说明人为干扰会改变自然生长竹林的空间结构和蓄积情况，虽然这样会增加竹林的生态功能的发挥，但这样的方式并不利于保护区植物的生长发育和正常演替。评价为“差”的森林以高海拔的人工单层针叶纯林为主。“较差”和“差”等级的森林将是今后治理与经营的重点。

4 结论与建议

针对上述结果，总结如下并提出以下几点发展建议。评价为“优”的竹林需人为管控，防止其向外扩张。评价为“较优”的森林建议以监测与保护为主，不宜过多干扰；评价为“中”的森林建议采取以重点监测为主的措施找出得分较低的原因，对症下药；评价为“较差”与“差”的森林，建议以封山抚育为主，重点经营，调整其森林结构，增加其抗干扰能力。由于每个功能区中均包含各个评价等级的森林，以上措施应当在符合国家对于各个功能区的规定的情况下进行。

实地调研发现：观音寨自然保护区的竹林大多为人工种植后物种入侵形成。保护区内竹林较多，且

表6 总体评价等级及面积占比明细表

Table 6 Overall evaluation grade and area proportion list

评价等级	得分范围	所占面积/hm ²	面积占比/%
差	[0, 1.197 016)	113.25	4.03
较差	[1.197 016, 1.642 155)	640.46	22.78
中	[1.642 155, 1.810 819)	813.63	28.94
较优	[1.810 819, 2.056 567)	1 075.94	38.28
优	[2.056 567, 2.472 611)	167.76	5.97
总计		2 811.04	100.00

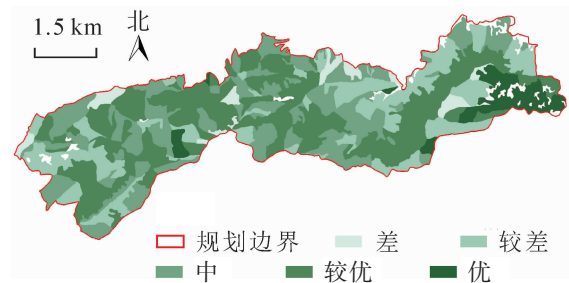


图1 森林生态功能总体评价结果示意图

Figure 1 Overall evaluation results of forest ecological function

占据立地条件较好位置，应当控制保护区内竹林的生长范围不再扩大，减弱人对于竹林的干扰，诱导其回到自然演替的过程中。针对针叶人工纯林，应当诱使其演替为乡土针阔混交人工林^[22]。

根据国家对于自然保护区功能分区的规定，保护区功能区划分的过程中应当尽量将评价等级高的森林划入核心区和缓冲区中，评价等级低的森林则划入实验区中，方便进行一定的森林结构调整和抚育。

本研究选取 19 项指标，通过投影寻踪分类法构建了观音寨自然保护区森林生态功能评价体系，并完成评价。但由于计算结果仅来源于观音寨自然保护区的数据，因此指标的重要性也仅能说明观音寨自然保护区的情况。对于后期同类型森林类型自然保护区或同纬度、特征相同森林的进行评价时，还需数据验证。本次评价还发现，指标权重部分的重要性排序上与施恭明等^[7]计算出的指标权重、《国家森林资源连续清查技术规定(2014)》中的指标权重还存在较大出入，可能与指标选取、森林特征不同有关。对于是否需要在计算权重的过程加入指标重要性排序的约束条件，还需进一步的思考和验证。

5 参考文献

- [1] 孟祥江. 中国森林生态系统价值核算框架体系与标准化研究[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2011.
MENG Xiangjiang. *Study on Accounting Framework System and Standardization of Forest Ecosystem Value* [D]. Beijing: Chinese Academy of Forestry, 2011.
- [2] 郭玉文, 孙翠玲, 单卫东. 关于森林生态功能评价的探讨[J]. 环境与开发, 1997, **12**(1): 13 – 16.
GUO Yuwen, SUN Cuiling, SHAN Weidong. Study on evaluation of forest ecological functions [J]. *Environ Exploit*, 1997, **12**(1): 15 – 18.
- [3] 余新晓, 秦永胜, 陈丽华, 等. 北京山地森林生态服务功能及其价值初步研究[J]. 生态学报, 2002, **22**(5): 783 – 786.
YU Xinxiao, QIN Yongsheng, CHEN Lihua, *et al.* The forest ecosystem services and their valuation of Beijing mountain areas [J]. *Acta Ecol Sin*, 2002, **22**(5): 783 – 786.
- [4] 赖兴会. 珠江源自然保护区的森林生态功能[J]. 林业调查规划, 2001, **26**(2): 54 – 57.
LAI Xinghui. Ecological function of forests of Zhujiangyuan Nature Reserve [J]. *For Invent Plann*, 2001, **26**(2): 54 – 57.
- [5] 刘延飞. 大通县有林地、疏林地、灌木林地现状分析评价[J]. 青海农林科技, 2011(1): 15 – 17.
LIU Yanfei. Analysis and evaluation on forest land, open forest land and shrub land in Datong County [J]. *Sci Technol Qinghai Agric For*, 2011(1): 15 – 17.
- [6] 尉卫平. 绍兴市越城区林地生态功能评价与结构优化研究[D]. 杭州: 浙江农林大学, 2011.
WEI Weiping. *Study on Woodland Ecological Function Evaluation and Structure Optimizing in Yuecheng Region of Shaoxing City* [D]. Hangzhou: Zhejiang A&F University, 2011
- [7] 施恭明, 陈绍玲, 江希钿, 等. 基于免疫进化算法的投影寻踪森林生态功能评价模型[J]. 福建林学院学报, 2013, **33**(2): 142 – 145.
SHI Gongming, CHEN Shaoling, JIANG Xidian, *et al.* Projection pursuit evaluation model of forest ecosystem function based on immune evolutionary algorithm [J]. *J Fujian Coll For*, 2013, **33**(2): 142 – 145.
- [8] 吴征镒, 周浙昆, 李德铎, 等. 世界种子植物科的分布区类型系统[J]. 云南植物研究, 2003, **25**(3): 245 – 257.
WU Zhengyi, ZHOU Zhekun, LI Dezhu, *et al.* The areal-types of the world families of seed plants [J]. *Acta Bot Yunnanica*, 2003, **25**(3): 245 – 257.
- [9] 吴征镒. 中国种子植物属的分布区类型[J]. 云南植物研究, 1991(增刊IV): 1 – 139.
WU Zhengyi. The areal-types of Chinese genera of seed plants [J]. *Acta Botanica Yunnan*, 1991(suppl IV): 1 – 139.
- [10] 王兵, 任晓旭, 胡文. 中国森林生态系统服务功能及其价值评估[J]. 林业科学, 2011, **47**(2): 145 – 153.
WANG Bing, REN Xiaoxu, HU Wen. Assessment of forest ecosystem services value in China [J]. *Sci Silv Sin*, 2011, **47**(2): 145 – 153.
- [11] 余新晓, 张振明. 森林生态系统结构与功能模型[M]. 北京: 科学出版社, 2010.
- [12] 卢立华, 冯益明, 农友, 等. 基于林班尺度的森林立地类型划分与质量评价[J]. 林业资源管理, 2018(2): 48 – 57.

- LU Lihua, FENG Yiming, NONG You, *et al.* Classification and quality evaluation of forest site types by using compartments as the research scale [J]. *For Resour Manage*, 2018(2): 48 – 57.
- [13] 龚岚. 北京城区典型城市森林结构特点分析[D]. 北京: 北京林业大学, 2015.
GONG Lan. *Analysis of Characteristics of Typical Urban Forest Structure in Urbanized District of Beijing* [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2015.
- [14] 奚存娃, 巩金萍, 巩垠熙. 基于BP神经网络的森林生态功能指数评价: 以甘肃森林资源清查数据为例[J]. 林业科技通讯, 2018(1): 7 – 12.
XI Cunwa, GONG Jinping, GONG Yinxi. Evaluation of forest ecological function index based on BP neural network: taking the data of forest resources inventory in Gansu as an example [J]. *For Sci Technol*, 2018(1): 7 – 12.
- [15] 李凯峰, 花尉攀. 混沌粒子群优化投影寻踪算法对建筑业可持续发展评价[J]. 山东农业大学学报(自然科学版), 2019, **50**(2): 323 – 327.
LI Kaifeng, HUA Weipan. Evaluation on sustainable development in the construction industry with chaos particle swarm optimization projection pursuit algorithm [J]. *J Shandong Agric Univ Nat Sci Ed*, 2019, **50**(2): 323 – 327.
- [16] 熊聘, 楼文高. 投影寻踪建模中关键参数合理值的确定与分析[J]. 计算机工程与应用, 2016, **52**(9): 50 – 55.
XIONG Pin, LOU Wengao. Determination and analysis of reasonable value of key parameter in projection pursuit clustering modeling [J]. *Computer Eng Appl*, 2016, **52**(9): 50 – 55.
- [17] 熊聘, 楼文高. 基于投影寻踪分类的长江流域水质综合评价模型及其应用模型[J]. 水资源与水工程学报, 2014, **25**(6): 156 – 162.
XIONG Pin, LOU Wengao. Water quality comprehensive evaluation and application model based on projection pursuit clustering in Yangtze River Basin [J]. *J Water Resour Water Eng*, 2014, **25**(6): 156 – 162.
- [18] 张雪莹, 张正勇, 刘琳. 新疆冰雪旅游资源适宜性评价研究[J]. 地球信息科学, 2018, **20**(11): 1604 – 1612.
ZHANG Xueying, ZHANG Zhengyong, LIU Lin. Suitability evaluation of ice and snow tourism resources in Xinjiang [J]. *J Geo-Inf Sci*, 2018, **20**(11): 1604 – 1612.
- [19] 杨锁华, 胡守庚, 瞿诗进. 长江中游地区生态系统服务价值的地形梯度效应[J]. 应用生态学报, 2018, **29**(3): 976 – 986.
YANG Suohua, HU Shougeng, QU Shijin. Terrain gradient effect of ecosystem service value in middle reach of Yangtze River, China [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2018, **29**(3): 976 – 986.
- [20] 楼文高, 熊聘, 乔龙. 投影寻踪分类模型建模中存在的问题及其改进[J]. 科技管理研究, 2014(6): 166 – 171.
LOU Wengao, XIONG Pin, QIAO Long. The mistaken in projection pursuit clustering modelling and improvement [J]. *Sci Technol Manage Res*, 2014(6): 166 – 171.
- [21] 楼文高, 乔龙. 投影寻踪分类建模理论的新探索与实证研究[J]. 数理统计与管理, 2015, **34**(1): 47 – 58.
LOU Wengao, QIAO Long. New theory exploration of projection pursuit clustering model and its positive research [J]. *J Appl Stat Manage*, 2015, **34**(1): 47 – 58.
- [22] 刘世荣, 杨予静, 王晖. 中国人工林经营发展战略与对策: 从追求木材产量的单一目标经营转向提升生态系统服务质量和效益的多目标经营[J]. 生态学报, 2018, **38**(1): 1 – 10.
LIU Shirong, YANG Yujing, WANG Hui. Development strategy and management countermeasures of planted forests in China: transforming from timber-centered single objective management towards multi-purpose management for enhancing quality and benefits of ecosystem services [J]. *Acta Ecol Sin*, 2018, **38**(1): 1 – 10.