

DOI: 10.5846/stxb201304070621

黄洁, 吝涛, 胡灯进. 基于网络分析的生态建设评估指标体系定量选取——以福建省为例. 生态学报, 2015, 35(3): 686-695.

Huang J, Lin T, Hu D J. Quantitative selection research on the evaluation indicators system for the ecological construction based on network analysis: a case study of Fujian. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(3): 686-695.

## 基于网络分析的生态建设评估指标体系定量选取 ——以福建省为例

黄 洁<sup>1,2</sup>, 吝 涛<sup>1,2,\*</sup>, 胡灯进<sup>3</sup>

1 中国科学院城市环境与健康重点实验室, 中国科学院城市环境研究所, 厦门 361021

2 厦门市城市代谢重点实验室, 厦门 361021

3 福建省海洋研究所, 厦门 361013

**摘要:** 科学有效的指标体系是开展区域生态建设评估以及规划、管理的重要手段。然而目前在生态指标体系构建中仍缺乏对指标内涵的系统研究, 同时指标的选取过程不够透明, 掺杂诸多主观臆断, 损害了生态指标体系构建的科学性和有效性。针对福建省生态建设实践, 将网络分析与量化指标选择过程相结合, (1) 根据福建省生态建设规划和目标, 建立主题导向的生态省建设评估网状指标体系; (2) 从因果联系、生态过程和管理需求三方面分析各个备选指标之间的相互联系, 形成基于主题导向的生态指标网络; (3) 根据生态指标应用的科学性和实用性标准, 基于网络分析原理, 建立生态建设评估指标选择标准矩阵和备选指标矩阵; (4) 构建面向经济社会成本和生态完整性的指标选取模型, 量化选取符合福建省实际发展特征的生态建设评估操作指标体系。将有助于深入理解生态建设评估指标体系的内涵, 提高指标体系构建的科学性和系统性, 提升生态指标体系在实际生态建设评估、规划和管理应用中的效用。

**关键词:** 生态指标; 指标选取; 网络分析; 定量方法; 生态建设

## Quantitative selection research on the evaluation indicators system for the ecological construction based on network analysis: a case study of Fujian

HUANG Jie<sup>1,2</sup>, LIN Tao<sup>1,2,\*</sup>, HU Dengjin<sup>3</sup>

1 Key Laboratory of Urban Environment and Health, Institute of Urban Environment, Chinese Academy of Sciences, Xiamen 361021, China

2 Xiamen Key Lab of Urban Metabolism, Xiamen 361021, China

3 Fujian Institute of Oceanography, Xiamen 361013, China

**Abstract:** Eco-province, eco-city and eco-county construction programs started in China in 2000, and since then, there have been more than 15 provinces including Fujian, Hainan, Zhejiang, Jiangsu etc. completed eco-province construction planning. Scientific and effective indicator system is an important tool to carry out the assessment, planning and management of regional ecological construction. However, some problems still exist in the construction of ecological indicator system, such as lack of systematic study on the essence of the indicator and subjective process of indicator selection, which severely impair the science and validity of the ecological indicator system. An objective and scientific process of selection supplies the way for fast ecological construction planning and its adjustment in the future. This paper combines the network analysis and quantitative selection of indicators to build an ecological indicator system based on the previous practice in Fujian Province. We (1) analyzed the main problems existed in the ecological construction, implementation and development

**基金项目:** 国家自然科学基金项目(41201598); 国家科技支撑计划课题(2012BAC21B03); 福建省软科学项目(2011R0093)

**收稿日期:** 2013-04-07; **网络出版日期:** 2014-04-03

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: tlin@iue.ac.cn

process, summarized the previous assessment indicators in the current ecological construction, studied the targets of Fujian eco-province construction practice, and established theme-oriented eco-province construction assessment network indicator system which contained 4 hierarchies and 55 concrete indicators representing experts and stakeholders' opinions; (2) identified the relationships among the indicators at the same or different hierarchies through the analysis of the cause-effect relationship, ecological processes and management requirements, and transformed them into an ecological hierarchy network (EHN) framework and assigned the weights of all the indicators based on the hierarchical structure and complex linkages of the EHN framework; (3) established indicator selection standard matrix which included *measurable, vulnerable, predictable, typical, controllable, integrative, responsive, and stable* criteria and built alternative indicator matrix of assessment system for ecological construction according to the scientific and efficient application standards of ecological indicator; (4) built a multi-objective selection model concerning socio-economic costs and ecological integrity and quantitatively select the ecological indicators system that is suitable for Fujian eco-province construction practice by genetic algorithm method. According to the selection results, at least 44 concrete indicators should be selected in the ecological construction assessment system of Fujian Province, 11 indicators were dropped out from the 55 alternative concrete indicators. The results showed that our research would be helpful for understanding the essence of the assessment indicator system of ecological province construction, improving the scientific and systematic level of indicator system construction, and enhancing the practicability of ecological indicator system for ecological construction assessment, planning and management. For the reason that it is hard to simulate the whole system by a purely mathematical model due to the limited understanding of complex ecosystem and social ecological system, it is suggested that the theme-oriented framework and network framework should be coupled with subjective and quantitative indicator selections for ecological construction practices of other provinces in China.

**Key Words:** ecological indicator; indicator selection; network analysis; quantitative method; ecological construction

随着中国社会经济的快速发展,资源消耗和环境污染日益严重,生态建设受到普遍关注。2000年开始启动生态省、市、县建设,截至2012年,全国已有海南、福建、浙江、江苏等15个省先后开展生态省建设<sup>[1]</sup>。生态建设实质是以可持续发展理论为基础,将一个行政区域作为一个社会经济自然复合生态系统<sup>[2]</sup>,运用生态系统原理、经济学原理和系统工程学方法,构建起一个和谐、高效、可持续发展的良性生态系统,实现经济效益、社会效益和生态效益的最佳统一<sup>[3]</sup>。生态建设评估是生态建设的重要技术保障,相关生态建设指标体系研究已得到政府部门和国内外学者的高度重视<sup>[3-10]</sup>。2000年中国国家环保总局从生态经济、社会发展、生态环境和生态文化4个方面13个具体领域提出了55个生态省建设考核指标;2007年颁布的《生态县、生态市、生态省建设指标(修订稿)》从经济发展、环境保护、社会进步方面,提出生态省建设的5项基本条件和16个具体指标。但由于各省发展状况差异,能够反映不同地区生态建设特征的统一规范的标准很难成形<sup>[4,7]</sup>。

目前,在评估指标体系的构建过程中,仍有两个核心问题亟需解决<sup>[11-12]</sup>:(1)建立既体现生态系统特征又符合生态省建设发展实际的指标体系框架,(2)选取科学性与实用性兼备的操作指标。目前,国际上常用于环境和可持续发展评估指标体系构建的指标体系框架包括因果网络框架(CN)和生态等级网络框架(EHN)其中,常用的CN包括压力-状态-响应框架(PSR)及其衍生出的驱动力-状态-响应框架(Drive-State-Response, DSR)和驱动力-压力-状态-影响-响应框架(DPSIR)<sup>[13-17]</sup>。EHN可根据生态系统的组分、结构和功能,界定总目标指标下的不同等级,从而有机整合相关的生态指标。此外,主题导向的指标框架(Theme-based Framework)可明确评估指标的政策相关性,集中指标评估管理的目标,因此在国际上受到越来越广泛的应用<sup>[17]</sup>。操作指标的选取将直接影响到生态建设监测、评估和管理实施的效果<sup>[18]</sup>,目前指标选取过程中仍存在,如没有可靠的指标选取标准<sup>[10]</sup>,或者仅对单个指标的选取设定标准,缺乏对生态完整性<sup>[18]</sup>和复杂性的考虑<sup>[11]</sup>等问题。同时,指标的选取过程不够透明,掺杂很多主观臆断。这些问题严重影响了生态指标体系构建

的科学性和有效性。针对以上问题, Niemeijer 和 De Groot<sup>[19]</sup> 提出通过 CN 对指标进行选取, 吝涛等<sup>[11-12]</sup> 提出通过构建 EHN 框架与定量化选取模型进行指标的科学选取。但目前为止, 针对透明化或定量化的指标选取研究仍很少见。

本文以福建省生态建设为案例, 整合因果网络、生态等级网络和主题导向指标框架, 将网络分析与量化指标选择过程相结合, 建立生态省建设评估网状指标体系; 再通过矩阵化分析和定量选取模型, 并利用遗传算法选出科学性与实用性兼备的操作指标集合。本研究可促进对生态建设评估指标体系内涵的深入理解, 提高指标体系构建的科学性和系统性, 提升生态指标体系在实际生态建设评估、规划和管理应用中的效用。

### 1 基于网络分析的生态建设评估指标选取过程与方法

#### 1.1 基本思路

基于网络分析的生态建设评估指标选取过程主要包括生态建设评估指标网络分析和生态建设评估操作指标选取两大部分。生态建设评估指标定量选取的具体技术路线, 见图 1。

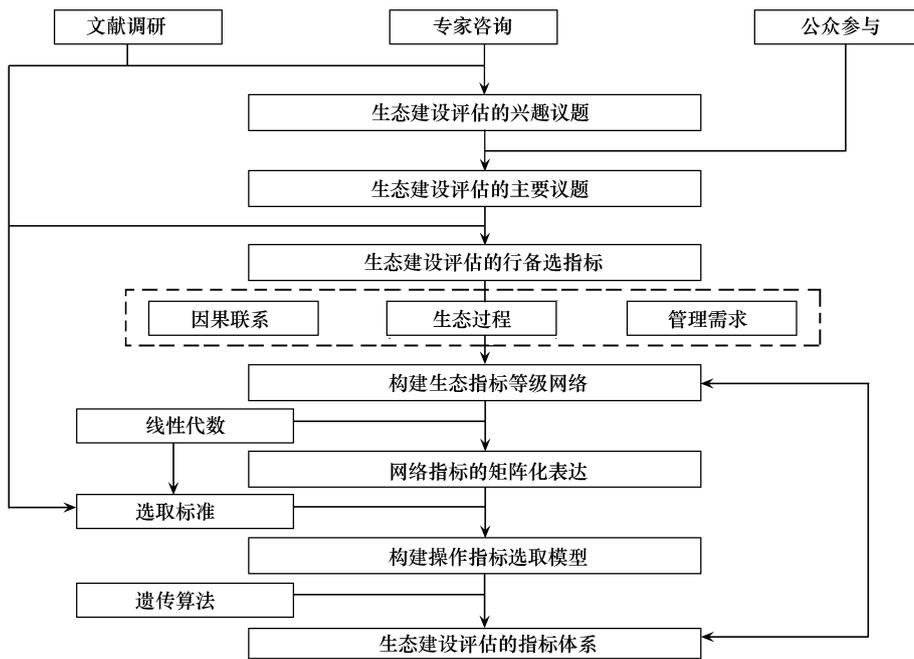


图 1 生态建设指标选取技术路线

Fig.1 Technical flows of indicator selection for ecological construction assessment

#### 1.2 生态建设评估指标网络构建

##### 1.2.1 构建等级网络指标框架

针对现行主要生态建设评估指标, 结合生态建设相关的法律法规和实际需求和限制, 首先通过文献调研和专家咨询形成生态建设评估兴趣议题, 通过利益相关者咨询和公众参与确定生态建设评估主要议题; 然后再通过文献调研和专家咨询收集可应用于生态建设评估的备选生态指标, 进一步分析备选指标与主要议题之间的等级和交叉联系, 形成生态建设评估指标网络。本文将在第二部分, 以福建省为例对该步骤方法做详细阐述。

##### 1.2.2 网状指标体系的指标权重计算

若不考虑各指标之间网络复杂联系的影响, 文中各级指标的权重值相等。采用权重二次分配法对构建的网状生态指标体系的指标进行权重分配<sup>[11]</sup>, 包括: (1) 将网状指标体系中重叠或交叉的联系分解, 进行等权重分配; (2) 将各层次指标的权重归一化处理, 然后将重叠或交叉指标的不同权重相加合并, 使各指标获得唯一权重。

### 1.3 生态建设评估操作指标定量化选取

#### 1.3.1 设置指标选取原则

采用 Dale 和 Beyeler 总结的选取生态指标的 8 个标准<sup>[20]</sup>,包括可计算性 (M)、敏感性(V)、可预测性 (P)、典型性(T)、可控性(C)、完整性(I)、反馈性(R)、稳定性(S)。其中,完整性标准适用于整个指标体系,其他标准适用于分别评价单个操作层指标。为保证评估指标体系的综合性,一般要求满足选取条件的单个指标权重总和不小于 0.85。

#### 1.3.2 生态建设评估指标及其选择标准的矩阵化表征

首先,通过线性代数的矩阵来表生态建设评估指标体系的结构,并将各层次之间的网络关系量化表示,构建操作层指标与分目标层指标的关系矩阵  $R$ 。

$$R = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & \cdots & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \cdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \cdots & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_1 \\ R_2 \\ R_3 \\ R_4 \\ \vdots \\ R_k \end{bmatrix} \quad (k \times j)$$

其中,行与分目标层指标对应, $k$  表示分目标层指标的个数;列与操作层指标对应, $j$  表示操作层指标个数。

然后,根据指标体系操作指标与指标标准匹配结果,建立生态指标选取标准与备选指标之间的评估矩阵  $D$ 。

$$D = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & \cdots & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & \cdots & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & \cdots & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & \cdots & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & \cdots & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & \cdots & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & \cdots & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} = [D_1, D_2, D_3 \cdots D_j \cdots D_{55}] \quad (i \times j)$$

其中,行与各个选取标准  $i$  对应,文中共选取 8 个标准  $i=1, 2, \dots, 8$ 。列与操作层指标对应,矩阵中 0 表示指标不满足该项标准,1 表示满足该项标准。

#### 1.3.3 定量化选择模型构建及实现

根据以上矩阵分析结果,并综合考虑以生态建设评估管理应用的实际要求,在保证指标生态完整性的基础上,构建面向社会经济成本最少的,即实际选择操作指标数目最少的目标模型(目标方程):

$$\min Z = \sum_{j=1}^{55} x_{4j} \cdot m_{4j} \quad (1)$$

$$R_k \cdot X_4' > 0 \quad (2)$$

$$X_4 \cdot W_4' > 0.85 \quad (3)$$

$$x_{4j} = 0 \text{ or } 1 \quad (4)$$

$$j = 1, 2, \dots, 55 \quad (5)$$

$$k = 1, 2, \dots, 8 \quad (6)$$

$$I_1' \cdot D_j = 5 \quad (7)$$

$$I_2' \cdot D_j \neq 3 \quad (8)$$

式中,  $Z$  代表生态指标要选择的数目;  $X_4$  代表方程解集,  $x_{4j}$  代表备选生态指标  $d_{4j}$  是否被选,  $m_{4j}$  表示指标  $d_{4j}$  实际操作的经济成本或社会成本;  $W_4$  表示  $d_{4j}$  指标的权重;  $R$  表示操作层指标与分目标层指标的关系矩阵。

目标方程(1)表示指标选取满足选取的操作指标数据最少;约束条件(2)表示以三级目标指标层( $d_{3k}$ )的指标作为保障生态完整性的目标层,每个指标所衍生的  $d_{4j}$  指标中至少有一个对应被选取;(3)表示参照主成分分析的要求,被选指标权重占原始权重比例不低于 85%;(4)表示备选指标只能被选择( $=1$ )或者被排除( $=0$ );(5)表示备选操作指标有 55 个;(6)表示指标选取标准有 8 个;(7)表示当指标满足 MVTCS 时,备选指标直接被选取( $x_{4j}=1$ );(8)表示当指标不满足 TCS 时,备选指标直接被排除( $x_{4j}=0$ )。

该指标选取模型是一个典型的二进制整数规划模型(BIP),可通过 Matlab 软件进行遗传算法(GA)编程对模型求解。

## 2 福建省生态建设评估指标体系案例分析

### 2.1 研究区概况

福建省位于中国东南沿海,全省土地总面积 12.4 万  $\text{km}^2$ ,海域面积 13.6 万  $\text{km}^2$ ,人口约 3689.4 万人(截止到 2010 年统计数据);属亚热带湿润季风气候,夏季炎热,并多台风,降水量年际变化极大,容易发生水旱灾害;主要土壤类型为红壤和黄壤;境内山地丘陵面积约占福建省土地总面积的 90%,全省森林覆盖率 63.1%,居全国首位。

福建省是全国生态建设试点省份之一,2000 年,时任省长习近平提出建设生态省的战略构想;2001 年福建成立生态省建设领导小组;2002 年,正式提出建设生态省的战略目标;2004 年出台《福建生态省建设总体规划纲要》;2006 年,省政府下发《关于生态省建设总体规划纲要的实施意见》,全面推进生态省建设;2010 年,正式实施《福建生态功能区划》;2011 年,省政府下发《福建生态省建设“十二五”规划》,明确到 2015 年,经济发展方式转变取得重大进展,生态省建设主要目标基本实现,率先建成资源节约型、环境友好型社会。

### 2.2 福建省生态建设评估指标的等级结构框架构建

#### 2.2.1 甄选主题导向的生态省建设评估等级指标

全国生态建设相关文件设定了生态建设的目标和任务。《全国生态示范区建设规划纲要(1996—2050 年)》以实现资源的永续利用和社会经济的可持续发展为战略目标,明确提出了生态示范区建设的 6 个类型;《全国生态环境建设规划》明确福建省生态建设的最主要任务是解决丘陵红壤区的水土流失、植被破坏、农村经济与能源等问题;《全国生态环境保护纲要》突出对自然资源作为重要生态环境要素或生态系统的生态功能的保护,强调了对重点生态功能区保护的重要性;2003 年发布的《生态县、生态市、生态省建设指标(试行)》是落实《全国生态环境保护纲要》的一项具体和重要措施;2007 年《生态县、生态市、生态省建设指标(修订稿)》明确规定了生态省建设的 5 项基本条件,以及包括经济发展、环境保护和社会进步共 16 项生态省建设指标,是进行生态省建设评估主要议题选取的主要参考。

表 1 福建省生态建设评估等级指标体系及权重值

Table 1 Fujian eco-province assessment indicators and their weights

总目标指标层 General indicators	分目标指标层 Abstract indicators				操作指标层 Concrete indicators
	一级分目标 First level		二级分目标 Second level		
区域生态建设 Ecological construction $d_{11}$ 1.0000	生态环境保护 $d_{21}$	0.2500	资源利用与保护 $d_{31}$	0.0500	林业资源 $d_{41}$ 0.0100 海洋资源 $d_{42}$ 0.0100 土地资源 $d_{43}$ 0.0100 水资源 $d_{44}$ 0.0100 矿产资源 $d_{45}$ 0.0100

续表

总目标指标层 General indicators	分目标指标层 Abstract indicators		操作指标层 Concrete indicators	
	一级分目标 First level	二级分目标 Second level		
经济发展 $d_{22}$	生态安全 $d_{32}$	0.0500	物种保护指数 $d_{46}$	0.0167
			外来物种防护 $d_{47}$	0.0167
	生态功能保护 $d_{33}$	0.0500	生态恢复 $d_{48}$	0.0292
			生态功能区划 $d_{49}$	0.0125
			自然保护区建设与保护 $d_{410}$	0.0125
			红壤区及湿地建设与保护 $d_{411}$	0.0125
	生态环境质量 $d_{34}$	0.0917	水环境质量 $d_{412}$	0.0183
			空气环境质量 $d_{413}$	0.0183
			声环境质量 $d_{414}$	0.0183
			土壤环境质量 $d_{415}$	0.0183
			生物质量 $d_{416}$	0.0183
			生态产业 $d_{35}$	0.0625
	循环经济 $d_{36}$	0.0625	生态工业 $d_{418}$	0.0208
			现代服务业 $d_{419}$	0.0208
			清洁生产 $d_{420}$	0.0208
			资源循环再利用 $d_{421}$	0.0208
	节能减排 $d_{37}$	0.0625	新能源开发 $d_{422}$	0.0208
			节能降耗 $d_{423}$	0.0208
	经济质量 $d_{38}$	0.1042	污染减排 $d_{424}$	0.0208
			经济发展水平 $d_{425}$	0.0365
产业结构 $d_{426}$			0.0261	
绿色 GDP $d_{427}$			0.0261	
社会进步 $d_{23}$	人居环境质量 $d_{39}$	0.0417	生态市建设 $d_{428}$	0.0104
			生态村镇建设 $d_{429}$	0.0104
			居民年人均可支配收入 $d_{430}$	0.0365
	生态文化 $d_{310}$	0.0774	生态文明宣传教育 $d_{431}$	0.0244
			绿色低碳生活方式 $d_{432}$	0.0259
			生态文化载体建设 $d_{433}$	0.0155
绿色消费 $d_{311}$	0.0417	绿色产品标识 $d_{434}$	0.0104	
		绿色产品管理及推广 $d_{435}$	0.0104	
		绿色消费理念 $d_{436}$	0.0259	
		预防监测体系 $d_{312}$	0.0857	环境监管体系 $d_{437}$
系统保障 $d_{24}$	0.2500	0.0857	灾害性天气预警体系 $d_{438}$	0.0143
			洪涝干旱灾害防治体系 $d_{439}$	0.0143
			森林火灾防控体系 $d_{440}$	0.0143
			农林水产疫病防治体系 $d_{441}$	0.0143
			地质灾害防治体系 $d_{442}$	0.0143
			法制建设 $d_{313}$	0.0357
	资金筹措 $d_{314}$	0.0357	政府环保投入 $d_{445}$	0.0119
			社会环保投入 $d_{446}$	0.0119
	科教支持 $d_{315}$	0.0357	科技投入与研发 $d_{447}$	0.0238
			生态建设的创新队伍培养 $d_{448}$	0.0119
生态技术应用与推广 $d_{449}$			0.0357	
公众参与 $d_{316}$	0.0357	社会舆论监管 $d_{450}$	0.0089	
		民间环保组织建设 $d_{451}$	0.0089	
		公民生态意识培养 $d_{452}$	0.0244	
		管理机制 $d_{317}$	0.0774	组织领导 $d_{453}$
0.0179	0.0774	地方协作 $d_{454}$	0.0258	
		奖惩机制和责任制 $d_{455}$	0.0258	

2011年福建省出台的《福建生态省建设“十二五”规划》是福建省生态建设最重要的政策文件之一,它以《福建生态省建设总体规划纲要》、《福建省国民经济和社会发展的第十二个五年规划纲要》和《福建省人民代表大会常务委员会关于促进生态文明建设的决定》等为编制依据。规划提出了福建省生态省建设的8个主要任务和规划实施保障,主要涉及生态经济、人居环境、节能减排、资源利用与保护、生态建设、环境治理、生态安全、生态文化、实施保障等9个方面。

结合全国生态建设相关文件的主要内容以及《福建生态省建设总体规划纲要》和《福建生态省建设“十二五”规划》对福建省生态建设的具体要求,本文认为:(1)生态省建设的最终目标是区域生态建设,为指标体系的总目标层;(2)“保障措施”作为生态省建设各项指标实现的基础,与《生态县、生态市、生态省建设指标(修订稿)》设定的“生态环境保护”、“经济发展”、“社会进步”一起构成本研究指标体系的一级次目标层。(3)二级次目标层是福建省提出的生态建设规划具体目标和任务,主要包括“资源利用与保护”、“生态安全”等共17个主题指标。(4)指标体系的操作层是对二级次目标层议题的进一步扩充和明确。通过文献调研和专家咨询,最终确定了“林业资源”、“海洋资源”等共55个指标(表1)。

2.2.2 福建省生态建设评估指标体系的网络化分析等级结构及网状指标体系的权重计算

在主题导向的生态省建设评估等级指标框架下,根据专家意见,从因果联系、生态过程和管理需求等方面具体分析并补充不同等级间指标的联系,形成“网状”等级指标体系(图2)。

其中,图中实线表示根据相关文件或文献获取的常见指标从属等级关系;虚线表示由于通过专家咨询和网络分析后根据因果联系、生态过程和管理需求添加的网络联系。如,由于  $d_{21}$  与  $d_{31}$ 、 $d_{32}$ 、 $d_{33}$ 、 $d_{34}$  之间用实线连接,表示根据《生态县、生态市、生态省建设指标(修订稿)》、《福建生态省建设总体规划纲要》等相关文件和文献可获得  $d_{21}$ (生态环境保护)与  $d_{31}$ (资源利用与保护)、 $d_{32}$ (生态安全)、 $d_{33}$ (生态功能保护)、 $d_{34}$ (生态环境质量)具有从属等级关系。而  $d_{21}$  与  $d_{312}$  之间用虚线连接,表示本研究认为  $d_{21}$ (生态环境保护)与  $d_{312}$ (预防监测体系)之间存在由于管理需求形成的网络联系。

通过二次权重分配<sup>[11]</sup>,使生态建设评估等级网络指标体系内的各指标获得唯一权重。具体指标权重结果如表1所示。

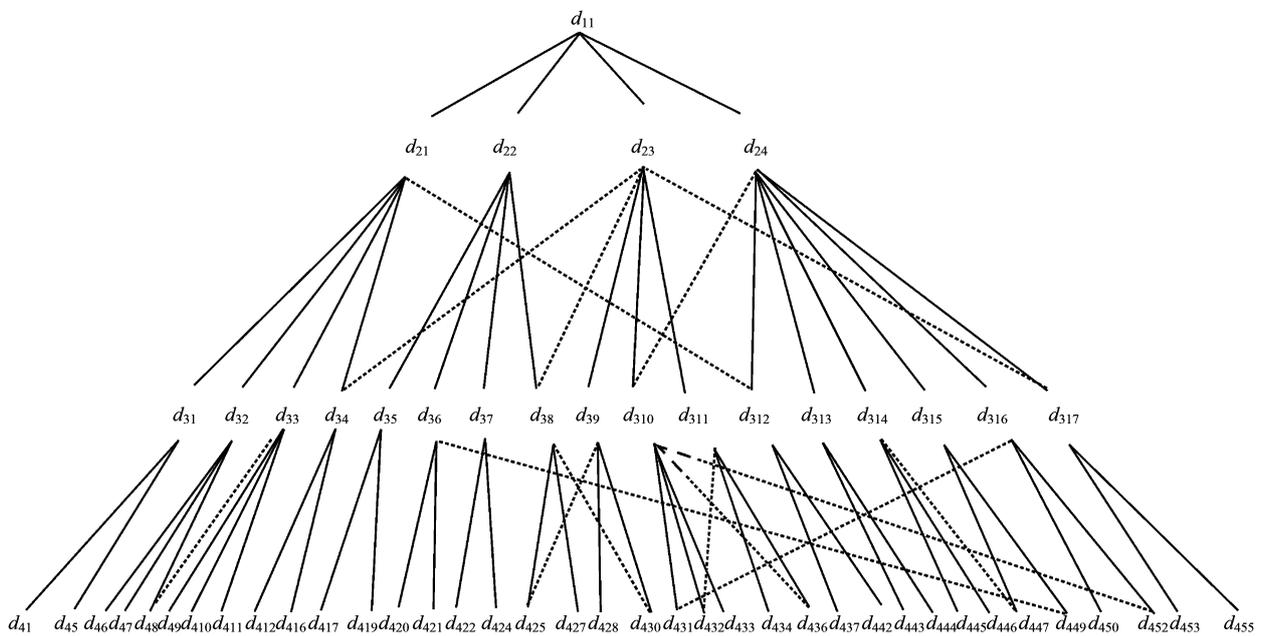


图2 福建省生态建设评估指标体系的等级结构和网络化联系

Fig.2 Hierarchical structure and network linkages of Fujian ecological province evaluation indicator system

2.3 定量化选取模型及其计算结果

2.3.1 操作指标选取标准匹配与分析矩阵构建结果

福建生态建设评估指标体系操作指标与指标选取标准匹配情况见表 2。例如,“林业资源”指标满足可计算性、敏感性、可预测性、典型性、可控性、反馈性、稳定性等 7 个标准。

根据福建省生态建设评估网络指标体系的等级结构,构建关系矩阵  $R$ 。

$$R = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & \cdots & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \cdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \cdots & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_1 \\ R_2 \\ R_3 \\ \vdots \\ R_k \\ \vdots \\ R_{16} \\ R_{17} \end{bmatrix} \quad (17 \times 55)$$

其中,矩阵中 0 表示无联系,1 表示有联系。如  $R_1$  表示指标  $d_{31}$  与  $d_{41}$ 、 $d_{42}$ 、 $d_{43}$ 、 $d_{44}$ 、 $d_{45}$  相联系。

根据福建省生态建设评估指标体系操作层指标与指标标准匹配结果,构建评价矩阵  $D$ 。

$$D = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & \cdots & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & \cdots & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & \cdots & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & \cdots & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & \cdots & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & \cdots & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & \cdots & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} = [D_1, D_2, D_3 \cdots D_j \cdots D_{55}] \quad (8 \times 55)$$

其中,矩阵中 0 表示指标不满足该项标准,1 表示满足该项标准,例如  $D_1$  表示  $d_{41}$  同时满足 7 项标准,即可计算性( $M$ )、敏感性( $V$ )、可预测性( $P$ )、典型性( $T$ )、可控性( $C$ )、反馈性( $R$ )、稳定性( $S$ )。

表 2 福建省生态建设评估指标体系操作层指标与指标标准匹配结果

Table 2 Assessment of concrete ecological indicators according to individual selection criteria

操作指标 Concrete indicators	所匹配的标准 Matched criteria	操作指标 Concrete indicators	所匹配的标准 Matched criteria
林业资源 Forest resource $d_{41}$	MVPTCRS	生态村镇建设 Construction of eco-towns and eco-villages $d_{429}$	MVTCRS
海洋资源 Marine resources $d_{42}$	MVPTCRS	居民年人均可支配收入 Annual per-capita disposable income of residents $d_{430}$	MVTCRS
土地资源 Land resources $d_{43}$	MVPTCRS	生态文明宣传教育 Ecological civilization education $d_{431}$	VTGRS
水资源 Water resources $d_{44}$	MVPTCRS	绿色低碳生活方式 Low carbon lifestyle $d_{432}$	VTGRS
矿产资源 Mineral resources $d_{45}$	MVPTCRS	生态文化载体建设 Construction of eco-cultural carriers $d_{433}$	VTGRS
物种保护 Species conservation $d_{46}$	MVTCRS	绿色产品标识 Green product identification $d_{434}$	MVTCRS
外来物种防护 Alien species prevention and control $d_{47}$	MVTCRS	绿色产品管理及推广 Green products management and promotion $d_{435}$	VTGRS

续表

操作指标 Concrete indicators	所匹配的标准 Matched criteria	操作指标 Concrete indicators	所匹配的标准 Matched criteria
生态恢复 Ecological restoration $d_{48}$	MVTCRS	绿色消费理念 Ecological consumption mode $d_{436}$	VTCRS
生态功能区划 Ecological function zoning $d_{49}$	VTCRS	环境监管体系 Environment regulation systems $d_{437}$	VTCRS
自然保护区建设与保护 Construction and protection of natural reserve $d_{410}$	MVTCRS	灾害性天气预警体系 Severe weather warning systems $d_{438}$	VTCRS
红壤区及湿地建设与保护 Construction and protection of red soil and wetland $d_{411}$	MVTCRS	洪涝干旱灾害防治体系 Flood and drought disaster prevention systems $d_{439}$	VTCRS
水环境质量 Water environmental quality $d_{412}$	MVPTCRS	森林火灾防控体系 Forest fire prevention and control systems $d_{440}$	VTCRS
空气环境质量 Air quality $d_{413}$	MVPTCRS	农林水产疫病防治体系 Agriculture, forestry and fisheries disease control systems $d_{441}$	VTCRS
声环境质量 Sound environmental quality $d_{414}$	MVPCRS	地质灾害防治体系 Geological disaster prevention and control systems $d_{442}$	VTCRS
土壤环境质量 Soil environment quality $d_{415}$	MVPTCRS	生态省建设规划纲要建设 Outline of ecological province construction $d_{443}$	VTCRS
生物质量 Biology quality $d_{416}$	MVPTCRS	相关环保法律配套及执行 Complement and implement of relevant environmental laws $d_{444}$	VTCRS
生态农业 Ecological agriculture $d_{417}$	MVTCRS	政府环保投入 Government environmental investment $d_{445}$	MVTCRS
生态工业 Ecological industry $d_{418}$	MVTCRS	社会环保投入 Social environmental investment $d_{446}$	MVTCRS
现代服务业 Modern service industry $d_{419}$	VTCRS	科技投入与研发 Science and technology input $d_{447}$	MVTCRS
清洁生产 Cleaner production $d_{420}$	MVTCRS	生态建设的创新队伍培养 Innovation personnel training $d_{448}$	MVTCRS
资源循环再利用 Resource recycling $d_{421}$	MVTCRS	生态技术应用与推广 Application and popularity of ecological technology $d_{449}$	MVTCRS
新能源开发 Development of clear energy $d_{422}$	MVCRS	社会舆论监管 Public opinion survey $d_{450}$	VCRS
节能降耗 Energy-saving and cost-reducing $d_{423}$	MVTCRS	民间环保组织建设 Construction of non-government environmental protection organization $d_{451}$	MVCRS
污染减排 Pollution reduction $d_{424}$	MVTCRS	公民生态意识培养 Cultivation of ecological consciousness of citizen $d_{452}$	VTCRS
经济发展水平 Level of economic development $d_{425}$	MVTCRS	组织领导 Organization and leadership $d_{453}$	VTCRS
产业结构 Industrial structure $d_{426}$	MVTCRS	地方协作 Local collaboration $d_{454}$	VTCRS
绿色 GDP Green GDP $d_{427}$	MVTCRS	奖惩机制和责任制 Rewards and punishment mechanism and accountability $d_{455}$	VTCRS
生态市建设 Ecological city construction $d_{428}$	MVTCRS		

### 2.3.2 模型运行结果分析

将福建省生态建设评估网状指标体系的权重值(表 1),关系矩阵  $R$  和评价矩阵  $D$ , 带入指标选取模型公式 I 中,通过 Matlab 软件进行遗传算法(GA)编程对模型求解:

当  $\min Z = 44 \times m$  ( $m$  代表单位经济成本或社会成本) 时:

$$X_4 = [1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 0, 1, 1, 1, 1, 0, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 0, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 0, 1, a, b, c, d, e, f, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 0, 0, 1, 1, 1, 1]$$

式中,  $a, b, c, d, e, f = 0$  或  $1$ , 且  $a+b+c+d+e+f=1$ 。

根据模型选取结果,福建省生态建设评估指标最少可取 44 个,比 55 个操作层指标减少了 11 个。其中,可暂不考虑的指标有声环境质量、新能源开发、社会舆论监管、民间环保组织建设;可整合到其他指标的是生态功能区划、绿色产品管理及推广;此外,环境监管体系、灾害性天气预警体系、洪涝干旱灾害防治体系、森林火灾防控体系、农林水产疫病防治体系、地质灾害防治体系可共同整合成一个指标,即预防监测体系构建。

### 3 讨论与结论

量化指标选取模型是选取科学合理的生态指标的方法保障,而网状指标体系的构建是构建量化指标选取模型的理论基础。本文通过将主题导向的生态等级网络框架与定量指标选取模型相结合,通过网络分析和线性规划方法构建适合福建省生态建设评估实际应用的指标体系,具体可以归纳为以下 4 个步骤:(1)分析生态建设实施和发展过程中主要目标和问题,总结现行主要生态建设与评估指标,根据具体案例区生态建设状况进行适当调整,建立等级性的主题导向的指标体系框架;(2)提炼出生态建设与评估各个主题下属的备选指标,分析各个备选指标之间的相互联系,形成基于主题导向的生态指标网络;(3)根据生态指标应用的科学性和时效性标准,基于网络分析原理,建立生态建设评估指标选择标准矩阵和备选指标矩阵;(4)通过线性规划原理构建面向多目标需求的操作指标选取模型,量化的选取符合生态建设发展实践的操作指标体系。

由于各个省的生态、经济、社会基础条件存在显著差异,各省生态建设纲要在具体内容上存在差异,关注的生态指标评估目标也不尽相同,因此福建省生态建设指标评估案例具有独特性,并不能直接推广到其他省生态建设评估中。同时,在具体操作指标选取中,由于不同专家的意见不同,也会对生态建设评估指标体系的构建造成影响。但是,基于网络分析的评估指标体系定量选取研究的基本思路和步骤适用于其他区域生态建设评估。此外,由于选取的过程实现量化,这将有利于管理者和学者对选取过程和结果进行反复验证和调整,然后进一步完善生态建设评估指标网络体系,并选出更符合当地发展实况的操作指标。

#### 参考文献 (References):

- [ 1 ] 武卫政. 全国已有 15 个省份开展生态省建设. 人民日报, 2012-8-27. [ 2013-4-28 ]. [http://paper.people.com.cn/rmrb/html/2012-08/27/nw.D110000renmrb\\_20120827\\_5-01.htm](http://paper.people.com.cn/rmrb/html/2012-08/27/nw.D110000renmrb_20120827_5-01.htm).
- [ 2 ] 马世骏, 王如松. 社会-经济-自然复合生态系统. 生态学报, 1984, 4 (1): 1-9.
- [ 3 ] 关琰珠. 生态省建设的指标体系研究——以福建省为例. 福建师范大学学报: 自然科学版, 2002, 18(4): 100-104.
- [ 4 ] 卞有生, 何军. 生态省生态市及生态县标准研究. 中国工程科学, 2003, 5(11): 18-24.
- [ 5 ] 中国环境保护总局. 全国生态环境建设规划. 北京: 中国环境保护总局, 1998.
- [ 6 ] 中国环境保护总局. 生态县、生态市、生态省建设指标 (修订版). 北京: 中国环境保护总局, 2007.
- [ 7 ] 张坤民, 温宗国. 城市生态可持续发展指标的进展. 城市环境与城市生态, 2001, 14 (6): 1-4.
- [ 8 ] Turnhout E, Hisschemoller M, Eijsackers H. Ecological indicators: between the two fires of science and policy. Ecological Indicators, 2007, 7 (2): 215-228.
- [ 9 ] Olsen L M, Dale V H, Foster T. Landscape patterns as indicators of ecological change at Fort Benning, Georgia, USA. Landscape and Urban Planning, 2007, 9(1-2): 137-149.
- [ 10 ] 傅伯杰, 刘世梁, 马克明. 生态系统综合评价的内容与方法. 生态学报, 2001, 21 (11): 1885-1892.
- [ 11 ] 吝涛, 薛雄志, 卢昌义. “网状”生态指标体系构建及其指标权重分配方法. 生态学报, 2007, 27(1): 235-241.
- [ 12 ] Lin T, Lin J Y, Cui S H, Cameron S. Using a network framework to quantitatively select ecological indicators, Ecological indicator, 2009, 9: 1114-1120.
- [ 13 ] Bowen R E, Riley C. Socio-economic indicators and integrated coastal management. Ocean and Coastal Management, 2003, 46: 299-312.
- [ 14 ] Organization for Economic Cooperation and development (OECD). Report of Towards Sustainable development: Environmental Indicators. Paris: 1998.
- [ 15 ] Lin T, Xue X Z, Lu C Y. Analysis of Coastal Wetland Changes using “DPSIR” model: a Case Study in Xiamen, China. Coastal Management, 2007, 35(2-3): 289-303.
- [ 16 ] Bondad-Reantaso M G, Prein M. Measuring the Contribution of Small-Scale Aquaculture: An Assessment. Rome: FAO, 2009.
- [ 17 ] Cairns J, McCormick P V, Niederlehner B R. A proposed framework for developing indicators of ecosystem health. Hydrobiologia, 1993, 236(1): 1-44.
- [ 18 ] Felix M, Regina H K, Hubert W. Indicating ecosystem integrity-theoretical concepts and environmental requirements. Ecological Modelling, 2000, 130(1-3): 13-23.
- [ 19 ] Niemeijer D, De Groot R S. A conceptual framework for selecting environmental indicator sets. Ecological Indicators, 2008, 8(1): 14-25.
- [ 20 ] Dale V H, Beyeler S C. Challenges in the development and use of ecological indicators. Ecological Indicators, 2001, 1: 3-10.