

“网状”生态指标体系构建及其指标权重分配方法

吝 涛 ,薛雄志* ,卢昌义

(近海海洋环境科学国家重点实验室 ,厦门大学环境科学研究中心 ,厦门 361005)

摘要 生态指标体系是广泛应用于监测、评估和管理生态系统的一种有效方法和工具。针对不同目的在使用生态指标体系时 ,构建完整的指标体系结构并合理确定操作指标的权重 ,是有效利用生态指标体系进行综合评价的 2 个关键问题。指出目前常用的“树权状”生态指标体系中存在的不足 ,提出在保持“树权状”生态指标体系原有指标和层次结构的基础上 ,通过弥补指标间的重叠和交叉联系 ,构建“网状”生态指标体系 ,体现生态系统的层次性和完整性。同时提出利用权重 2 次分配法对规则和不规则“网状”生态指标体系中的指标进行权重分配。通过构建生态健康评价指标体系的案例研究 ,对比“树权状”和“网状”生态指标体系在结构和指标权重分配上的不同。还针对构建和实际应用“网状”生态指标体系时的 2 个问题进行了讨论。

关键词 生态指标 ;指标体系 ;权重分配

文章编号 :1000-0933 (2007)01-0235-07 中图分类号 :Q148 ,X171.1 文献标识码 :A

Methods for developing a net shape ecological indicator system and assigning rational weights to the indicators

Lin Tao ,Xue Xiongzhi* ,Lu Changyi

State Key Laboratory of Marine Environmental Science ,Environmental Science Research Center ,Xiamen University ,Xiamen 361005 ,China

Acta Ecologica Sinica 2007 27 (1) 0235 ~ 0241.

Abstract :The complexity of an ecosystem is only seen in parts and its interrelationships are never well understood. Ecological indicators are able to represent ,integrate and characterize information embodied in comprehensive data sets when direct measurements cannot be realized. Ecological indicator system (EIS) is normally made up of a number of ecological indicators with certain structure to represent the most important features of the environmental state ,the complex ensembles of ecosystem elements and the multiple webs of actions ,reactions and interactions.

As an effective tool or approach ,the ecological indicator system (EIS) is widely used in ecosystem monitoring ,assessment and management. While there are many different forms of EIS based on the different purposes for EIS uses ,they are all concerned with the following two key steps :structure of the integrated EIS frame and the assignment of rational weights to the ecological indicators. The frame of the EIS should integrally reflect not only the ecological hierarchy ,but also the relationships among the complex ensembles of the investigated ecosystem. The status or the importance of an indicator in the EIS will be represented by its weight ,which ,to some extent ,will be determined by the frame of an EIS.

This paper reviewed the branch shape ecological indicator system (BEIS) which is in common use at present ,and point out its deficiency : (1) the overlapping or intersecting connections of the indicators are often overlooked or simplified.

基金项目 国家自然科学基金资助项目 (40371049) ;福建省自然科学基金资助项目 (D031002)

收稿日期 2005-12-05 ;修订日期 2006-04-26

作者简介 吝涛 (1978 ~)男 ,河北邯郸人 ,博士生 ,主要从事环境生态学和海岸带管理. E-mail :lint@ xmu. edu. cn

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail :xzxue@ jingxian. xmu. edu. cn

Foundation item The project was financially supported by National Natural Science Foundation of China (No. 40371049) ,Fujian Province Natural Science Fund (No. D031002)

Received date 2005-12-05 ;**Accepted date** 2006-04-26

Biography Lin Tao ,Ph. D. candidate ,mainly engaged in coastal management and environmental ecology. E-mail :lint@ xmu. edu. cn

Q) Incorrect weights are assigned to the indicators because of disintegrated representation of the ecosystem complexity. Secondly , a net shape ecological indicator system (NEIS) was presented ,including regular NEIS and irregular NEIS. It is developed by adding the overlapping and intersecting relation of the ecological indicators to the BEIS hierarchy frame and thus will better represent the integration and hierarchy of ecosystem. Then a twice assigning weight method (TAW) was demonstrated in both regular NEIS and irregular NEIS. This was used to resolve the problem of assigning the rational weights to NEIS indicators. For further study and comparison of BEIS and NEIS ,two indicator systems for ecosystem health assessment were derived from hierarchical ecosystem indicators respectively , using the frames of BEIS and NEIS. The weights of the indicators in BEIS were determined by the AHP and those in NEIS were determined by TAW. It was easy to see the changes of the weights of the indicators in between the BEIS and NEIS. The indicators' weights in NEIS have a significant trend to the average compared with those in BEIS. Two problems about the NEIS design and application were discussed.

Key Words : ecological indicator ; indicator system ; assign weight

生态指标体系 (Ecological indicator system , EIS)是监测、评估和管理生态系统的一种有效方法和工具^[1] , 它由一系列有一定层次结构的指标构成 ,用来代表生态系统复杂的成分、结构和功能^[2]及其之间的联系 ,体现生态系统的层次性^[3]和完整性^[4~6]。目前 ,生态指标体系在生态系统健康评价^[7~11]和生态系统综合评价等^[12~14]方面得到了广泛的应用。针对不同目的构建的生态指标体系有所不同 ,但是构建完整指标体系结构并合理确定各指标在体系中的权重 ,是利用生态指标体系进行综合评价的 2 个关键问题。生态指标体系结构要客观地再现生态系统各要素 (包括生物和非生物要素)的相互作用和联系 ,指标的权重则代表了生态系统中各生态要素的重要性和地位 ,对于操作指标 ,权重的大小也反映了该指标体现生态指标总目标的程度或比例。生态指标体系的结构在一定程度上决定了指标权重的分配方式 ,而指标的权重又会直接影响生态指标体系的评价结果和使用效果。本文对目前常用的生态指标体系进行分析 ,指出其中存在的不足 ;同时提出一种新的生态指标体系来改进现有的指标体系 ,并进一步探讨了在这种新的生态指标体系中确定指标权重的方法。

1 “树杈状”生态指标体系和“网状”生态指标体系

1.1 “树杈状”生态指标体系及其存在的不足

目前的生态指标体系一般由总目标指标层、分目标指标层和操作指标层 3 部分构成 ,如图 1。总目标指标层位于指标体系的顶层 ,通常由一个综合指标构成 ,代表生态指标体系的最终或综合结果 ,操作指标层位于生态指标体系的底层 ,由多个容易直接获得量化结果的指标构成 ,这些指标需要进行实际调查、分析 ,作具体评价 ,分目标指标层位于以上两者之间 ,是总目标指标的具体外延 ,可包含多个层次 ,它是对总目标指标层和操作指标层之间联系和作用机制的分析和说明。在目前的生态指标体系中 ,上层指标与下层指标之间互不重叠或交叉 ,即下层的每一个指标只能从属于一个上层指标 ,是单向分散的承接关系 ,呈现“树杈”形状 ,本文称为“树杈状”生态指标体系 (Branch shape indicator system , BEIS)。

但是在分析各个生态指标的作用和联系时 ,往往会遇到这样的一些指标 ,它们与两个或更多的上层指标都具有密切联系 ,例如生态系统的景观指标可以重复用作生态系统成分、结构和功能指标的下层指标 ,森林覆

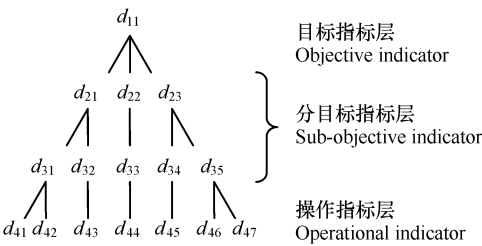


图 1 “树杈状”生态指标体系

Fig. 1 Branch shape ecological indicator system (BEIS)

实线表示“树杈状”生态指标体系中指标在层次间的联系 , d_{ij} 表示生态指标 , i 表示该指标所在的层次 , j 表示该指标在某一层次的位置 Real line means the indicator relation within hierarchies in BEIS. d_{ij} represent ecological indicator , i is the level number of the indicator ; j is the place number of indicator at the same level

盖率和湿地类型既可作为生态结构指标,也可作为生态功能指标。这是由于在实际的生态系统指标的相互关系中,除了具有生态层次性外,还具有重叠性和交叉性。这些重叠和交叉的指标能够从属于并指示 2 个以上的上层指标。由此可见,目前的“树权状”生态指标体系中存在以下两方面明显的不足:

(1)人为忽略或简化了指标之间的重叠和交叉联系,将各层次指标间的关系简单化,因此降低了生态指标体系对真实生态系统完整性的表征;

(2)由于生态指标之间重叠和交叉联系信息的缺失,影响了具有重叠和交叉联系的指标权重分配合理性。

1.2 “网状”生态指标体系

针对目前“树权状”生态指标体系存在的不足,本文提出补充层次间指标的重叠和交叉联系,前者表示一个指标可以指示两个以上的上层指标,如图 2A 中 d_{22} 、 d_{23} 与 d_{33} 的关系,后者表示两个指标可以相互表示对方的上层指标,如图 2A 中 d_{21} 、 d_{22} 与 d_{23} 、 d_{33} 的关系,交叉联系可以认为是重叠联系的一种特殊情况。“树权状”生态指标体系虽然忽略了指标间的重叠和交叉联系,但是它较好地反映了生态系统的层次性。因此,“网状”生态指标体系 (Net shape indicator system, NEIS) 可以继承“树权状”生态指标体系中选取的指标及其层次结构,并通过补充指标间的重叠和交叉联系,反映生态系统的完整性并合理的分配指标权重。

“网状”生态指标体系可分为规则网状结构和不规则网状结构两种:前者是指指标间的联系完全按照层次结构来承接,即指标之间的重叠和交叉关系发生在相邻的两个层次,如图 2A,能量在各营养级生物呈阶梯状的传递和流动就可以用规则“网状”生态指标表现。后者是指指标间的联系不完全按照层次结构来承接,即指标间的联系可以跨越两个甚至两个以上的层次,如图 2B 中 d_{23} 与 d_{44} 的联系,食物链中物种的捕食关系可以通过不规则“网状”指标体系表现。

“网状”生态指标体系更为完整地体现了生态系统中成分、结构和功能等要素间的复杂关系,并为限制指标权重信息的丢失提供了前提。接下来本文将进一步探讨“网状”指标体系中各层次指标进行权重分配的方法。

2 “网状”生态指标体系指标权重的分配方法

2.1 规则“网状”生态指标体系权重的分配

以图 2A 的网状指标体系为例,用 w_{ij} 表示指标 d_{ij} 的权重:

(1)通过对指标 d_{11} (权重为 1) 的权重分配 (具体分配方法略),获得第 2 层次指标的权重 w_{21} , w_{22} , w_{23} 。

(2)将第 2 层和第 3 层指标之间重叠和交叉的联系进行分解,如图 3A,求出第 3 层指标的权重: w_{31} , w_{32} , w_{33} , w_{32} , w_{33} , w_{33} , w_{34} , w_{35} , 此时第 3 层指标的权重中有两个 w_{32} , 有 3 个 w_{33} 。

(3)对第 3 层指标的权重进行再分配,即将同一指标的多个权重合并,使第 3 层每个指标获得唯一权重: w_{31} , w_{32} , w_{33} , w_{34} , w_{35} 。

(4)将第 3 层和第 4 层指标之间重叠和交叉的联系进行分解,见图 3A,根据步骤 (3) 第 3 层每个指标的唯一权重 w_{31} , w_{32} , w_{33} , w_{34} , w_{35} , 求出第 4 层指标的权重: w_{41} , w_{42} , w_{43} , w_{43} , w_{44} , w_{45} , w_{45} , w_{46} , w_{45} , w_{46} , w_{47} , 此时第 4 层指标的权重中有 2 个 w_{43} , 有 3 个 w_{45} , 2 个 w_{46} 。

(5)对第 4 层指标的权重进行再分配,即将同一指标的多个权重合并,使第 4 层每个指标获得唯一权重: w_{41} , w_{42} , w_{43} , w_{44} , w_{45} , w_{46} , w_{47} 。到此权重分配完成。

在求“网状”生态指标体系中第 3 层以后的指标权重时,只需根据上层确定的指标唯一权重,通过分解重叠和交叉的指标联系和两次分配权重即可获得。在规则的网状指标体系中,重叠和交叉的联系限制在两个层

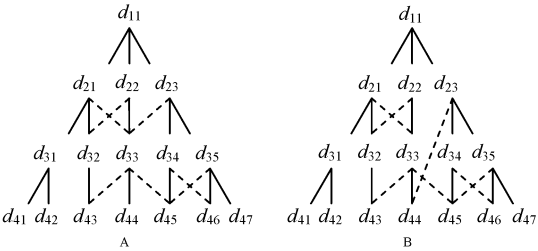


图 2 “网状”生态指标体系

Fig. 2 Net shape ecological indicator system (NEIS)
虚线表示在“网状”生态指标体系中补充的指标间的重叠或交叉联系 Dead line means the overlapping and intersecting relation of the indicators in BEIS

次之间,因此权重可以均匀的从上层分配至下层,各层的指标权重和保持为1,即 $(w_{ij}=1(i=1,2,3,\dots))$ 。

2.2 不规则“网状”生态指标体系权重的分配

以图2B的不规则“网状”指标体系为例:

- (1)通过对指标 d_{11} (权重为1)的权重分配,获得第2层次指标的权重 w_{21},w_{22},w_{23} 。
- (2)将第2层和第3、4层指标之间重叠和交叉的联系进行分解,如图3B,求出第3层指标的权重: $w_{31},w_{32},w_{33},w_{32},w_{33},w_{44},w_{34},w_{35}$;此时第3层指标的权重中有2个 w_{32} ,有2个 w_{33} 和1个 w_{44} 。
- (3)对第3层指标的权重进行再分配,即将同一指标的多个权重合并,使第3层每个指标获得唯一权重: $w_{31},w_{32},w_{33},w_{34},w_{35}$,同时第四层的指标 d_{44} 也获得1个 w_{44} 。
- (4)将第3层和第4层指标之间重叠和交叉的联系进行分解,见图3B,根据步骤(3)中第3层每个指标的唯一权重 $w_{31},w_{32},w_{33},w_{34},w_{35}$,求出第4层指标的权重: $w_{41},w_{42},w_{43},w_{43},w_{44},w_{45},w_{45},w_{46},w_{45},w_{46},w_{47}$ 。加上步骤(3)中获得的1个 w_{44} ,此时第4层指标的权重中有2个 w_{43} ,2个 w_{44} ,3个 w_{45} ,2个 w_{46} 。
- (5)对第4层指标的权重进行再分配,即将同一指标的多个权重合并,使第4层每个指标获得唯一权重: $w_{41},w_{42},w_{43},w_{44},w_{45},w_{46},w_{47}$ 。

在不规则的“网状”指标体系中,重叠和交叉的联系会超越两个层次之间,因此权重不能均匀的在各层次传递,所以各层指标的权重和不一定保持为1。例如在图3B中,由于第2层的指标 d_{23} 与第4层指标 d_{44} 产生联系,减少了由 d_{23} 分配给 d_{44} 的 w_{44} ,因此第3层指标的权重总和 <1 ,而第4层增加了由 d_{23} 分配给 d_{44} 的权重 w_{44} ,指标权重总和仍等于1。

由此可知,解决“网状”指标体系中指标权重确定的方法,主要包含两个步骤:(1)将“网状”指标体系中重叠或交叉的联系分解,变为“树权状”结构,进行指标权重确定,称为第1次权重分配。此时重叠或交叉的指标将同时被不同的分树权层次赋予权重。(2)将各层次指标的权重归一化处理,然后将重复或交叉指标的不同权重相加合并,使各指标获得唯一权重,称为第2次权重分配。由于对某些层次中的指标权重进行了两次分配,因此“网状”生态指标体系指标的权重分配法称为权重二次分配法。

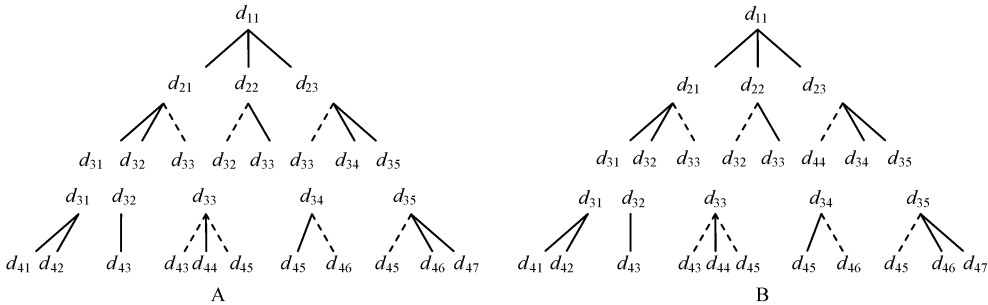


图3 “网状”生态指标体系中指标重叠和交叉联系的分解
Fig. 3 Break down the overlapping and intersecting relation of the ecological indicators within the NEIS

3 案例研究:构建生态健康评价指标体系

为了进一步对比“树权状”和“网状”生态指标体系的差异,同时演示“网状”生态指标体系的构建步骤和指标权重的确定方法。从Virginia^[3]总结的层次性生态指标体系中选取并补充部分生态指标,以目前常见的生态健康评价为目标,分别构建“树权状”和“网状”生态评价指标体系,并计算两种指标体系中指标的权重,对比两者的不同。

首先构建“树权状”生态健康评价指标体系,以生态健康综合指数作为总目标指标层;生态系统成分健康、结构健康和功能健康作为第一级分目标指标层,选择能够分别指示生态系统成分、结构和功能健康的指标作为第二级分目标指标层,选择能够指示第二级分目标指标健康,并在实践中容易获得量化评价结果的生态指标作为操作指标层,如表1,指标体系结构见图4A。

表 1 “树权状”生态健康评价指标体系构成

Table 1 the fame of BEIS for ecological health assessment

总目标指标层 Objective indicator	分目标指标层 Sub-Objective indicator		操作指标层 Operational indicator
	一级分目标 First level	二级分目标 Second level	
生态健康综合指数 Ecosystem health indicator d_{11}	生态系统成分健康 Composition health indicator d_{21}	非生物环境 Physical Environment d_{31}	土壤质量 Soil quality d_{41}
			水环境质量 Water quality d_{42}
			气候变化 Climate Change d_{43}
		生物成分 Biological Composition d_{32}	植被覆盖率 Vegetation cover d_{44}
			总生物量 Biomass d_{45}
			物种多样性指数 Biodiversity index d_{46}
	生态系统结构健康 Structure health indicator d_{22}	物种多样性 Species diversity d_{33}	水资源分布 Water distribution d_{47}
		营养物质分布 Nutrient distribution d_{34}	景观破碎度 Fragmentation d_{48}
			初级生产力 Primary productivity d_{49}
	生态系统功能健康 Function health indicator d_{23}	自我调节能力 Self-organization d_{36}	生态系统演变阶段 Succession d_{410}
		物质循环 Nutrient cycling d_{37}	氮循环率 Nitrogen cycling rate d_{411}
		能量流动 Energy flow d_{38}	生物营养级数 Trophic level d_{412}

在“树权状”生态指标体系的基础上,进一步分析各层次指标之间的重叠和交叉联系。分析结果发现:物种多样性和自我调节能力可以交叉指示生态系统结构和功能;土壤质量和水环境质量可以重叠表示非生物环境和生产力;景观破碎度可以重叠表示营养分布和物种多样性;生物营养级数可以重叠表示能量流动率和生态系统结构。其中它与生态系统结构指标的联系是不规则的。由此可以构建“网状”生态健康指标体系,如图 4B。

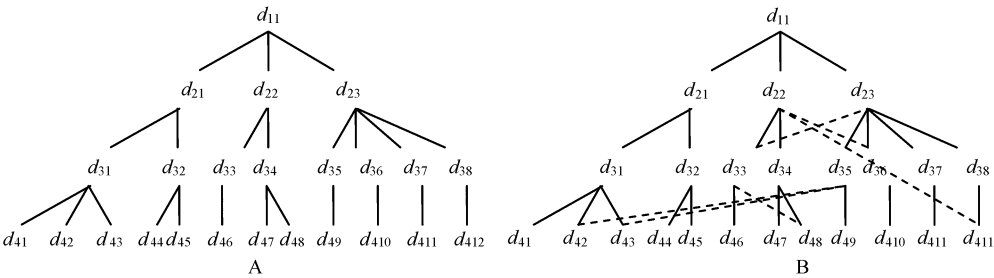


图 4 “树权状”和“网状”生态健康评价指标体系

Fig. 4 BEIS and NEIS for ecological health assessment

利用层次分析法^[15]对“树权状”生态指标体系中指标的权重逐层进行分配,获得各层指标的权重;同样利用层次分析法,参照上文权重二次分配法对不规则“网状”生态指标体系指标权重进行分配的步骤,获得“网状”生态指标体系中指标的权重。结果见表 2。

对比案例研究中“树权状”和“网状”指标体系操作指标的权重,见图 5,发现由于指标体系结构的不同,12 个操作指标获得的权重也产生明显差异。总体上看,“网状”生态健康指标体系中指标的权重明显比“树权状”生态指标体系中的权重趋向平稳。这可能是因为在“网状”指标体系中考虑了更多指标间的联系,因此相

互牵制,使整体的指标权重趋于均匀,但是这种趋势是不是所有“网状”指标体系相对于“树权状”指标体系的特点,还有待于进一步研究。

表2 “树权状”和“网状”生态健康评价指标体系中的指标权重
Table 2 Indicators' weight in BEIS and NEIS for ecological health assessment

总目标指标层 Objective indicator	分目标指标层 Sub-Objective indicator		操作指标层 Operational indicator
	一级分目标 First level	二级分目标 Second level	
d_{11} 1.000	d_{21} 0.333/0.333	d_{31} 0.111/0.111	d_{41} 0.022/0.044
			d_{42} 0.022/0.044
			d_{43} 0.067/0.067
		d_{32} 0.222/0.222	d_{44} 0.074/0.074
			d_{45} 0.148/0.148
			d_{46} 0.222/0.141
	d_{22} 0.333/0.333	d_{33} 0.222/0.211	d_{47} 0.074/0.067
		d_{34} 0.111/0.100	d_{48} 0.037/0.103
			d_{49} 0.167/0.109
			d_{410} 0.100/0.116
	d_{23} 0.333/0.333	d_{35} 0.167/0.153	d_{411} 0.033/0.026
		d_{36} 0.100/0.116	d_{412} 0.033/0.059
		d_{37} 0.033/0.026	
		d_{38} 0.033/0.026	

* “树权状”生态指标体系的指标权重/“网状”生态指标体系的指标权重 Indicators' weight in BEIS / in NEIS

4 讨论

4.1 构建“网状”生态指标体系时应注意的问题

(1)避免指标联系的重复。本文认为“树权状”生态指标体系已经对指标的层次性联系作了有效分析,因此“网状”生态指标体系中,上层指标不应该与其下层指标延伸出的指标产生重叠和交叉,如总目标指标(d_{11})不应与任何次下层指标(d_{ij} , $i(3)$)产生联系,因为所有次下层指标都是由总目标指标通过层次结构延伸而来,它们的联系已经通过生态层次结构得以表达。

(2)要适当简化生态指标体系。当构建指标数目较大的“网状”指标体系时,由于指标间的复杂关系(除单向对应关系外,还有重叠和交叉关系),往往会使体系构建和指标权重分配工作变得复杂而庞大。同时过多地考虑指标间的微弱联系,也会影响指标权重的合理分配,因此,在指标体系中应谨慎的考虑指标间的重叠和交叉联系,适当简化“网状”生态指标体系结构。

(3)“树权状”和“网状”生态指标体系的选取。经管本文指出了“树权状”存在的问题,但在面对相对集中或已经简化的生态问题时,使用“树权状”生态指标体系则可,而“网状”生态指标体系则可作为一种深入探讨,或者对前者的检验。“网状”生态指标体系是一种对复杂生态问题的具体解析,或者是对生态问题内部因素之间真实联系的模拟。因此构建指标体系时,应根据研究的具体目的选择指标体系的类型。

4.2 关于操作指标的数量与评价效果

操作指标是实际用来测量和直接评估的指标,它的权重分配直接影响对总目标指标的评价。在指标体系中考虑指标间的重叠和交叉关系,使指标体系的指标在层次间的联系更加灵活,不仅多个下层指标可以指代一个上层指标,多个上层指标也可以通过一个下层指标来指代。这样,如果不以“树权状”生态指标体系的原有指标和层次来构建“网状”生态指标体系,那么一个生态指标体系的下层指标数就不必多于上层指标数,因此“网状”生态指标体系的形状不一定是逐层发散,也可以是其他的特殊形状,如图6,而下层指标获得的权重也不一定要低于其从属的上层指标。由此可知,利用生态指标体系进行生态评价时,操作指标不一定要等于

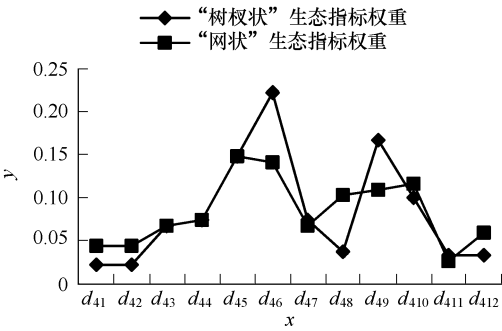


图5 “树权状”和“网状”生态健康评价指标体系中操作指标权重

Fig. 5 Comparing the indicators' weight in BEIS and NEIS for ecological health assessment.

x 轴是操作指标 y 轴是操作指标的权重值 x axis is the operational ecological indicator ; y axis is the indicators' weight value

或多于分目标指标的数目,对于总目标指标评价结果的优劣并不取决于操作指标的数目多少,而在于操作指标是否能真实体现生态系统各要素联系的完整性,以及指标权重分配是否合理。

5 结论

本文探讨了“网状”生态指标体系在体现生态系统层次性和完整性上的优势,并通过权重 2 次分配法获得“网状”指标体系中的指标权重,然后利用案例研究对比了“网状”生态指标体系与“树权状”生态指标体系在结构和指标权重分配上的异同,最后讨论了在应用“网状”生态指标体系时须注意的两个问题。

在实际应用中,“网状”指标体系不仅可以用于解决与生态系统相关的例如环境影响评价,可持续发展评估等问题,同样适用于与生态系统相似的复杂体系问题的解决,例如区域经济、社会评估等。使用“网状”指标体系来体现包括生态系统在内的复杂系统,具有两个明显优势:(1)是对复杂系统内各因素间联系的体现比“树权状”指标体系更清楚、更完整。(2)是“网状”指标体系有利于提高操作指标权重分配的合理性,从而能更准确地评价处于指标体系顶层的总目标指标。

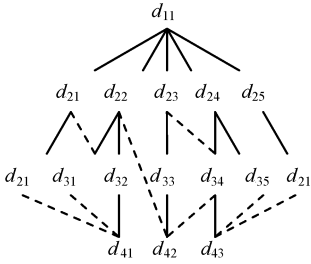


图 6 特殊的“网状”生态指标体系
Fig. 6 Particular NEIS

References :

[1] Cairns J , McCormick P V , Niederlehner B R. A proposed framework for the developing indicators of ecosystem health. *Hydrobiologia* ,1993 ,236 : 1—44.

[2] Karr J R. Assessment of biotic integrity using fish communities. *Fisheries* ,1981 ,16 :21—27.

[3] Virginia H D , Suzanne C Beyeler. Challenges in the development and use of ecological indicators. *Ecological Indicators* ,2001 ,1 :3—10.

[4] Karr J R. Biological integrity : a long neglected aspect of water resource management. *Ecol. Applications* ,1991 ,1 :66—84.

[5] Angermeier P L , Karr J R. Biological integrity versus biological diversity as policy directives : protecting biotic resources. *Bio Science* ,1994 ,44 : 690—697.

[6] Felix M , Regina H k , Hubert W. Indicating ecosystem integrity-theoretical concepts and environmental requirements. *Ecological Modeling* ,2000 ,130 :13—23.

[7] Yuan X Z , Liu H. Assessment of ecosystem health — concept framework and indicator selection. *Chinese Journal of Applied Ecology* ,2001 ,12 (4) :27—629.

[8] Xu F L , Zhao Z Y , Zhan W , *et al.* An ecosystem health index methodology (EHIM) for lake ecosystem health assessment. *Ecological Modeling* , 2005 ,188 :327—339.

[9] Cui B S , Yang Z F. Establishing an Indicator System for Ecosystem Health Evaluation on Wetlands I. A Theoretical Framework. *Acta Ecologica Sinica* ,2002 ,22 (7) :1005—1011.

[10] Wu L F , Ou Y Z , Tan DY. The quantitative assessment of agro-ecosystem health on a regional dimension. *Acta Ecologica Sinica* ,2004 ,24 (12) : 2740—2748.

[11] Luo Y C , Zhou Z X , Sun Y , *et al.* Assessment methods of watershed ecosystem health. *Acta Ecologica Sinica* ,2003 ,23 (8) :1606—1614.

[12] Luo S H , Ma W C , WAN G R , *et al.* A case study on indicator system of urban environmental protection and ecological construction. *Acta Ecologica Sinica* ,2003 ,23 (1) :45—55.

[13] Li X M , Min M , Tan C F. The functional assessment of agricultural ecosystems in Hubei Province ,China. *Ecological Modeling* ,2005 ,187 :352—360.

[14] Fu B J , Liu S L , Ma K M. The contents and methods of integrated ecosystem assessment (IEA) . *Acta Ecologica Sinica* ,2001 ,21 (11) :1885—1892.

[15] Saaty , T L. The Analytic Hierarchy Process. Pittsburgh , Pennsylvania : RWS Publications , 1990.

参考文献；

[7] 袁兴中,刘红. 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):27~629.

[9] 崔保山,杨志峰. 湿地生态系统健康评价指标体系 I. 理论. *生态学报*,2002,22(7):1005~1011.

[10] 武兰芳,欧阳竹,唐登银. 区域农业生态系统健康定量评价. *生态学报*,2004,24(12):2740~2748.

[11] 罗跃初,周忠轩,孙轶,等. 流域生态系统健康评价方法. *生态学报*,2003,23(8):1606~1614.

[12] 罗上华,马蔚纯,王祥荣,等. 城市环境保护规划与生态建设指标体系实证. *生态学报*,2003,23(1):45~55.

[14] 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.