

突变级数法在生态适宜度评价中的应用

——以镇江新区为例

陈云峰¹, 孙殿义², 陆根法^{1,*}

(1. 南京大学环境学院, 污染控制与资源化研究国家重点实验室, 南京 210093; 2. 中国科学院办公厅, 北京 100864)

摘要:《开发区区域环境影响评价技术导则》(HJ/T2003)已将生态适宜度评价列为区域环境影响评价的主要内容,并明确提出了三级指标集成的框架要求,但并未推荐具体的技术方法。在当前的环评工作实际中,出现了多种生态适宜度的评价技术,如排列成比较技术、层次分析、模糊评价法等,然而这些方法却普遍存在着权重分配过程中的主观性问题。而对于生态适宜度评价这类多指标集成的问题,无论采用何种技术方法,只有减少权重赋值的主观性才能体现评价结论的科学性。鉴于此,推荐了一种新型的生态适宜度评价方法——突变级数法。通过镇江新区环评的具体案例分析,突变级数法表现出在生态适宜度评价方面较好的适用性。更为重要的是,通过对前述 3 种方法的数理分析对比,突变级数法表现出主营以下两方面的比较优势:首先该法不使用权重,只需按指标间的内在逻辑关系对指标的重要程度进行排序,很大限度地避免了人为制定权重的主观性;同时,作为定性定量相结合的技术方法,突变级数法不仅可以对各地块是否适合其利用类型做出评价,还可以运用模型计算出各个地块生态适宜度的具体数值,对不同地块的生态适宜性程度进行定量的对比。诚然,应该客观地指出,在按指标的重要程度排序过程、以及评价指标的量化分级过程中,突变级数法仍然不能完全避免人为主观性,这也需要今后继续探索整合其他技术方法,加以进一步完善。

关键词:突变级数法;生态适宜度评价

文章编号:1000-0933(2006)08-2587-07 中图分类号:X171 文献标识码:A

Application of catastrophe progression method in ecological suitability assessment: A case study on Zhenjiang new area

CHEN Yun-Feng¹, SUN Dian-Yi², LU Gen-Fa^{1,*} (1. State Key Laboratory of Pollution Control and Resources Reuse, School of Environment, Nanjing University, Nanjing 210093, China; 2. General Office of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100864, China). *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(8): 2587 ~ 2593.

Abstract: Ecological suitability assessment has been listed as a important part of content in regional environmental impact assessment according to < Technical guidelines for environmental impact assessment of development area > (HJ/T2003), which only requires to set up three-hierarchy indicators system but without appointed approaches to integrate these indicators. In current practice, several approaches have been attempted to apply, such as arranging and comparison technology, analytic hierarchy process and fuzzy evaluation. However, due to the subjectivity in weight evaluation, these approaches are afraid of the objectivity of their results. Catastrophe progression method is an approach dealing with multiple indicators integration, which is suitable for the complex system decision because of its simpleness and objectiveness. With a case study on Zhenjiang New Area, the basic principle for catastrophe progression method and its applying steps in ecological suitability assessment are introduced in this paper. The case study shows the applicability of catastrophe progression method in ecological suitability assessment. What is more important, through analyzing and contrasting the mathematical essence of the three above-mentioned approaches, catastrophe progression method demonstrates obvious comparative advantages of two following respects mainly: on one hand, it does not use

收稿日期:2005-12-01;修订日期:2006-06-26

作者简介:陈云峰(1969~),男,安徽合肥人,博士生,从事环境数值仿真研究。

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: lugf@nju.edu.cn.

Received date: 2005-12-01; Accepted date: 2006-06-26

Biography: CHEN Yun-Feng, Ph. D. candidate, mainly engaged in environmental numerical simulation.

any weight, only need to arrange indicators in an order of important degree according to the inherent logic relationship among indicators, this avoids making the subjectivity of the artificial weight evaluation in very large limit; on the other hand, as a technological approach that combine qualitative analysis and quantitative analysis together, catastrophe progression method is not only suitable to judge whether a piece of land is suitable for its using patterns, but also provide models to calculate out the concrete number value of ecological suitability, and help to carry on the quantitative contrast of ecological suitability among different pieces of land. However, what should be pointed out objectively is, in the course of arranging indicators in the order of important degree and hierarchizing indicators, the artificial subjectivity in catastrophe progression method can't be avoided completely, so it would be necessary to combine other technological approaches to improve the future application of catastrophe progression method in ecological suitability assessment.

Key words: catastrophe progression method; ecological suitability assessment

土地利用的生态适宜度评价是从生态学的视角,分析区域开发的有利条件,明确生态环境的制约因素,从而寻求最佳的土地利用方式和合理的规划方案。生态适宜度评价目前已被广泛应用于区域开发建设规划和区域开发环境影响评价,国家环保总局 2003 年 8 月 1 日颁布实施的《开发区区域环境影响评价技术导则》(HJ/T2003)也将生态适宜度评价列为区域环境影响评价的主要内容。

《导则》提出了生态适宜度评价的技术方法框架,即采用三级指标体系,选择对土地利用目标影响最大的一组因素作为评价指标。在各单项指标评分的基础上,通过指标加权,对各种土地利用方式进行综合评价。但对于多级指标集成过程中如何对权重赋值,并没有做出明确的规定,因此在实际的评价工作中,出现的各类方法如排列成比较技术^[1]、层次分析^[2]、模糊评价法^[3]等不一而足,而这些方法普遍存在着权重分配过程中主观性强、量化程度差等问题。

本文以镇江新区规划环评为例,提出的突变级数法是一种基于突变理论的多指标集成技术,它无需人为的确定权重,只须把握各评价指标间的主次关系。该方法运用简单,又较为客观,特别适用于内部机理未知的复杂大系统的多目标决策问题。目前,突变级数法已经被广泛应用到许多领域,但是用于土地利用的生态适宜度评价,尚未见报道。

1 镇江新区概况

镇江新区为省级经济开发区,是镇江市“一城两翼”城市格局的东翼,北邻长江,南接沪宁高速和沪宁铁路,具有突出的区位优势。新区分为丁卯和大港两个片区,规划建成以国际化学工业园、机电工业园、高新技术产业园、出口加工区、中心商贸区等“3 园 2 区”为主体的镇江市社会经济发展重要增长极,总体布局见图 1。

2 突变理论与突变级数法

突变级数法的理论基础是系统新三论之一的突变理论。突变理论是由法国数学家勒内·托姆(Rene Thom)于 1972 年创立的,是利用动态系统的拓扑理论来构造自然现象与社会活动中不连续变化现象的数学模型,并以此描述和预测事物连续性中断的质变过程,是目前唯一研究由渐变引起突变的系统理论。突变模型的研究对象是系统的势函数。势函数是描述系统的控制变量与状态变量之间的相对关系、相对位置的函数。托姆已证明,当控制变量不超过 4 个,则势函数最多只有 7 种突变形式(表 1)。

突变模型中应用较多的是尖点突变和燕尾突变,这里不加推导地给出这 2 种模型的分叉集,分叉集是使势函数发生突变的控制变量的取值:

$$\text{尖点突变} \quad c_1 = -6x^2, c_2 = 8x^3$$

$$\text{燕尾突变} \quad a = -10x^2, b = 20x^3, c = -15x^4, d = 4x^5$$

突变级数法的基本原理就是利用落在分叉集内的控制变量的取值会使系统的状态发生突变这一性质来构建评价模型。

以尖点突变模型为例,决定系统状态的控制变量有两个: c_1 和 c_2 。 c_1 是导致系统突变的主要因子, c_2 是

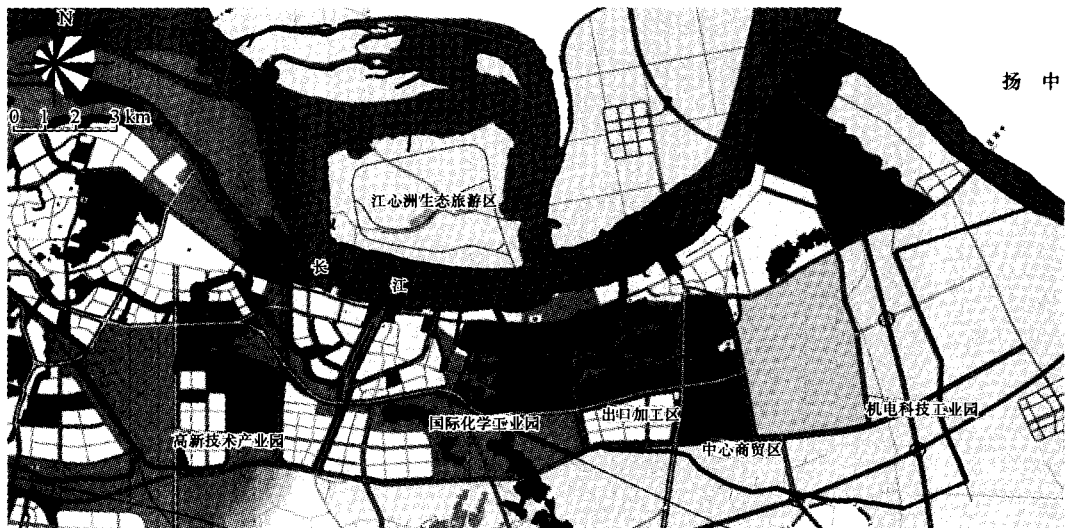


图 1 镇江新区总体布局
Fig.1 The overall layout of Zhenjiang new area

高新技术产业园 Hi-Tech industry park;国际化学工业园 International chemical industry park;机电科技工业园 Mechano-electronic science & industry park;出口加工区 Export processing zone;中心商贸区 Center commerce and trade zone;江心洲生态旅游区 Central shoal ecotourism zone;焦山景区 Mount Jiaoshan landscaped area;禹山风景区 Mount Yushan landscaped area;横山风景区 Mount Hengshan landscaped area;甬山风景区 Mount Chuishan landscaped area;长江 Yangtze River;扬中 Yangzhong

导致系统突变的次要因子,当 c_1 和 c_2 满足分叉集方程时,系统状态将发生突变,即从一种质态跳跃到另一种质态。构建评价模型时,当某个上级(把它看作系统状态变量 x)包含两个下级指标时,即重要指标 c_1 和次要指标 c_2 ,根据分叉集方程就可以利用 c_1 和 c_2 的值求得系统发生突变时的状态变量值 x ,即上级指标值。同理,当上级评价指标可以分解成 3 个、4 个下级指标时,对各个子指标按重要程度进行排序,可以分别运用燕尾突变模型和蝴蝶突变模型计算上级指标值。

表 1 突变形式及其势函数
Table 1 Optimization functions of the 7 basic catastrophe models

突变模型 Forms	控制变量 Dimensions of control space	状态变量 Dimensions of behavior space	势函数 Potential function
折叠突变 Fold	1	1	$V(x) = x^3 + ux$
尖点突变 Cusp	2	1	$V(x) = x^4 + ux^2 + vx$
燕尾突变 Swallowtail	3	1	$V(x) = x^5 + ux^3 + vx^2 + wx$
蝴蝶突变 Butterfly	4	1	$V(x) = x^6 + tx^4 + ux^3 + vx^2 + wx$
双曲脐点突变 Wave crest	3	2	$V(x, y) = x^3 + y^3 + wxy - ux - vy$
椭圆脐点突变 Hair	3	2	$V(x, y) = \frac{1}{3}x^3 - xy^2 + w(x^2 + y^2) - ux + vy$
抛物脐点突变 Mushroom	4	2	$V(x, y) = x^2y + y^4 + ax^2 + by^2 + cx + dy$

利用分叉集方程是不能直接进行分析评价的,因为状态变量与控制变量的取值范围不统一,也不能同模糊隶属数的 0~1 的取值范围一致。因此,必须把各突变模型中状态变量、控制变量的取值范围限制在 0~1,即归一化。对分叉集进行变换、推导,得:

尖点突变模型归一公式 $x_1 = c_1^{\frac{1}{2}}, x_2 = c_2^{\frac{1}{2}}$

燕尾突变模型归一公式 $x_1 = c_1^{\frac{1}{2}}, x_2 = c_2^{\frac{1}{2}}, x_3 = c_3^{\frac{1}{4}}$

归一公式把系统内诸控制变量的不同质态化为同一质态,即把控制变量统一化为状态变量表示的质态。多个控制变量在利用归一公式计算后将分别得到多个状态变量值,最终的值可采用“大中取小”的原则或取平

均值。假若系统的诸控制变量之间不可相互弥补不足,则从诸控制变量对应的 x 值中,即 x_1, x_2, x_3 中选取最小的一个作为整个系统的 x 值,即为“大中取小”,因为只有这样才能满足分叉集方程而发生质变。而当系统的各个控制变量之间可以相互补充其不足时,则取 x_1, x_2, x_3 的平均值。

综上,突变级数法的评价步骤如下:

(1)建立多级评价指标体系,并对各级指标按重要程度进行排序。如果一个指标所对应的下级指标有 2 个,可视为以该指标为状态变量、2 个下级指标为控制变量的尖点突变系统。同理,如果一个指标有 3 个下级指标,该系统可视为燕尾突变系统。如果一个指标有 4 个下级指标,该系统可视为蝴蝶突变系统。如果一个指标的下一层指标个数多于 4 个,就需要利用主成分分析法对指标进行合并,使合并后的指标个数不超过 4 个。

(2)利用突变模型的归一公式,并依照“大中取小”或“互补”原则求得各级状态变量值,最顶级状态变量即是最终评价指标——生态适宜度,计算时只需知道最底层指标的原始数据即可。

3 镇江新区土地利用的生态适宜度评价

3.1 划分评价单元

目前土地利用的生态适宜度评价大多采用网格法,将评价区域划分成 $m \times n$ 个网格,针对每个网格逐个进行计算和评价。网格法适合于大尺度的区域评价,尤其是方便于在 GIS 平台上的操作,但也存在网格的划分与实际地块边界不吻合的缺陷。为增强评价结论的针对性,本次评价单元按实际的规划地块进行划分。根据镇江新区总规,大港片区被划分为 79 个地块,丁卯片区被划分为 15 个地块。

3.2 构建评价指标体系

采用特尔斐法,即专家意见法确定评价指标体系。请若干专家在彼此隔离的情况下分别填写镇江新区生态适宜度评价指标体系调查表,回收汇总后,把统计结果返回给各位专家陈述理由或做修改后再次给出评价指标体系。如此反复,直至专家意见逐步收敛,基本趋于一致(表 2、表 3)。

表 2 工业用地生态适宜度评价指标体系
Table 2 Ecological suitability assessment indicator system for industrial land

一级指标 One-level indicator	二级指标 Two-level indicators	三级指标 Three-level indicators	考核内容 Remark
工业用地生态适宜度 Ecological suitability of industrial land A1	环境协调性 B ₁ Environmental compatibility	大气环境影响度 C ₁ Air environment impact degree	规划工业用地对周围地块大气环境影响的程度 The impact degree of industrial land on around air environment
	基础设施 B ₂ Infrastructure	距供热管网距离 C ₂ Distance away from heating pipe network	开发区基础设施的建设情况 The progress in the construction of infrastructure
		距排污管网距离 C ₃ Distance away from sewage pipe network	
	土地开发条件 B ₃ Land development conditions	用地指数 C ₄ Land use indicator	土地利用状况等级 U 与土地条件等级 L 的比值 Land use degree to land condition degree ratio
		土地条件 C ₅ Land conditions	地形坡度 slope gradient

3.3 评价指标的量化分级

根据专家意见,三级指标的评分分为 4 级:很适宜、适宜、基本适宜、不适宜,对应地给评价指标赋值,分别为:3、2、1、0(表 4)。一级指标也分为 4 级:很适宜、适宜、基本适宜、不适宜(表 5)。

3.4 数据预处理

为了解决模型参数的量纲统一问题,需要对各指标数据做无量纲化处理,使各数据在消除量纲后的取值区间限制在 0~1 内。

(1)对越大越好型指标: $\frac{x_i - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}}$

表 3 商贸及居住用地生态适宜度评价指标体系
Table 3 Ecological suitability assessment indicator system for commercial land

一级指标 One-level indicator	二级指标 Two-level indicators	三级指标 Three-level indicators	考核内容 Remark
商贸及居住用地生态适宜度 Ecological suitability of commercial and residential land A ₂	环境质量 B ₄ Environmental quality	风向敏感度 C ₆ Wind direction sensitivity	大气污染的敏感程度 Sensitivity to air pollution
		噪声扰民度 C ₇ Noise interference level	居住用地的声环境质量 Acoustical environment of residential land
	功能适宜度 B ₅ Function suitability	综合功能配套性 C ₈ Comprehensive function overcoatability	交通、金融、文教、医疗设施等的配套完整性 Complement completeness, including traffic, finance, culture and education, medical treatment, etc.
	绿化与景观 B ₆ Afforestation and landscape	绿地覆盖率 C ₉ percentage of greenery coverage 景观良好性 C ₁₀ Landscape goodness	绿地占地百分比 Greening land to total land ratio 包括植被多样性、水质、视频、视觉质量等因素 Including vegetation multiplicity, water quality, vision frequency, vision quality, etc.

表 4 评价指标的量化分级
Table 4 value assignment of three-level indicators

一级指标 One-level indicator	二级指标 Two-level indicators	三级指标 Three-level indicators	考核内容 remark	很适宜(3) Very suitable	适宜(2) suitable	基本适宜(1) Mainly suitable	不适宜(0) Not suitable
环境质量 Environmental quality	风向敏感度 Wind direction sensitivity	大气污染的敏感程度 Sensitivity to air pollution	上风向为生态用地、农地 The leeward side is ecological and agricultural land	上风向为商贸、居住用地 The leeward side is commercial and residential land	上风向为轻污染工业用地 The leeward side is low-contaminated industrial land	上风向为重污染工业用地 The leeward side is heavy-contaminated industrial land	
		噪声扰民度 Noise interference level	居住用地的声环境质量 Acoustical environment of residential land	< 50dB	50 ~ 55dB	55 ~ 60dB	> 60dB
商贸及居住用地生态适宜度 Ecological suitability of commercial and residential land	功能适宜度 Function suitability	综合功能配套性 Comprehensive function overcoat-ability	交通、金融、文教、医疗设施等的配套完整性 Complement completeness, including traffic, finance, culture and education, medical treatment, etc.	完善 Completed	较完善 Mainly completed	一般 Average completed	较差 Not completed
	绿化与景观 Afforestation and landscape	绿地覆盖率 percentage of greenery coverage	绿地占地百分比 Greening land to total land ratio	> 30%	20% ~ 30%	15% ~ 20%	15%
		景观良好性 Landscape goodness	包括植被多样性、水质、视频、视觉质量等因素 Including vegetation multiplicity, water quality, vision frequency, vision quality, etc.	优 Excellent	良 Fine	一般 Average	较差 Not good
	环境协调性 B ₁ Environmental compatibility	大气环境影响度 C ₁ Air environment impact degree	规划工业用地对周围地块大气环境影响的程度 The impact degree of industrial land on around air environment	下风向为工业用地 The leeward side is industrial land	下风向为农业用地 The leeward side is agricultural land	下风向为生态景观用地 The leeward side is ecological and landscape land	下风向为居住、商业用地 The leeward side is commercial and residential land
工业用地生态适宜度 Ecological suitability of industrial land	基础设施 B ₂ Infrastructure	距供热管网距离 C ₂ Distance away from heating pipe network	开发区基础设施的建设情况 The progress in the construction of infrastructure	< 0.5km	0.5 ~ 1km	1 ~ 1.5km	> 1.5km
		距排污管网距离 C ₃ Distance away from sewage pipe network		< 0.5km	0.5 ~ 1km	1 ~ 1.5km	> 1.5km
	土地开发条件 B ₃ Land development conditions	用地指数 C ₄ Land use indicator	土地利用状况等级 U 与土地条件等级 L 的比值 Land use degree to land condition degree ratio	< 0.5	0.5 ~ 1.0	1.0 ~ 1.5	> 1.5
		土地条件 C ₅ Land conditions	地形坡度(°) slope gradient	0 ~ 2	2 ~ 8	8 ~ 16	> 16

表 5 一级指标的评价标准

Table 5 Ecological suitability assessment indicator system for commercial land

标准 Indicator	很适宜 Very suitable	适宜 suitable	基本适宜 Mainly suitable	不适宜 Not suitable
生态适宜度 Ecological suitability	1 ~ 0.85	0.85 ~ 0.70	0.70 ~ 0.50	0.50 ~ 0

(2) 对越小越好型指标: $\frac{x_{\max} - x_i}{x_{\max} - x_{\min}}$

3.5 指标集成

指标逐级集成的突变级数法见图 2、图 3。

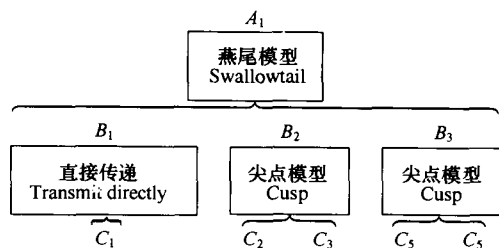


图 2 工业用地生态适宜度评价的突变级数法

Fig.2 Catastrophe progression method for the ecological suitability assessment of industrial land

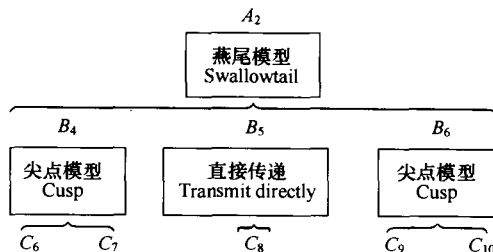


图 3 商贸及居住用地生态适宜度评价的突变级数法

Fig.3 Catastrophe progression method for the ecological suitability assessment of commercial and residential land

3.6 评价结论

大港的 79 地块中,很适宜 47 块,适宜 16 块,基本适宜 14 块,不适宜 2 块,总体情况较好。生态适宜度较高地块集中在生态用地周边及各园区腹地,偏低地块集中在中心商贸区与东部造纸化工区、机电工业园的交界处。丁卯的 15 个地块中,很适宜 10 块,适宜 5 块,无基本适宜和不适宜地块,总体情况优于大港。生态适宜度较高地块集中在生态用地周边以及各园区腹地,略低地块集中在中心商贸区与工业园区交界处。

4 讨论

对于生态适宜度评价这类多指标集成的问题,无论采用何种技术方法,只有减少权重赋值的主观性才能体现评价结论的客观性和科学性。下面就目前运用较多的排列成比较技术、层次分析法、模糊评价法等方法进行技术路线方面的对比分析。

(1) 排列成比较技术的规则是首先将评价因子按重要程度从小到大排序,其次确定后一个因子对前一个因子的重要程度,用倍数 r_i 表示,并令第一个因子的重要程度为 $r_1 = 1$ 。 r_i 值确定后按下列公式计算各评价因子的权重:

$$W = \frac{U_i}{\sum_{j=1}^n U_j} \quad j = 1, 2, \dots, n$$

$$U_1 = 1, U_i = r_i \times r_{i-1} \times r_{i-2} \times \dots \times r_1$$

由此可知,排列成比较技术在权重计算中,需要逐个确定后一个因子对前一个因子的重要程度,即 r_i ,主观性较强。

(2) 针对镇江新区土地利用的生态适宜度评价,采用层次分析法进行了对比评价(图 4),得到了与本文一致性的结论。

层次分析法较排列成比较技术,在权重赋值方面减少了主观性,但同时层次分析法是定性的评价技术,对于既有定性指标又有定量指标的问题,往往表现的定量不足。在本文的案例研究中,只能得出一个地块适合用作什么类型,无法对不同地块的适宜性程度进行对比。

(3) 模糊评价法是通过建立隶属函数,把绝对的属于或不属于“非此即彼”扩展为更加灵活的渐变关系,解

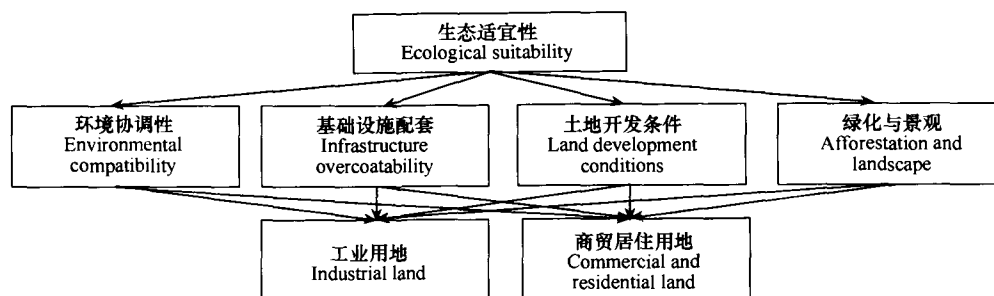


图4 层次分析法的递阶层次结构

Fig.4 The progressive hierarchical structure of analytic hierarchy process

决了多指标评价中的一刀切问题。但模糊评价法也属于定性的评价技术,也无法对比不同地块间的生态适宜性程度。此外,模糊评价法主要适用于单级的多指标评价,难以应用于《导则》要求的三级指标体系的多级指标评价。

综上所述,通过对目前运用较多的排列成比较技术、层次分析法、模糊评价法等方法的数理分析,突变级数法的比较优势主要体现在以下两个方面:

(1)客观性较强 突变级数法不使用权重,只需按指标间的内在逻辑关系对其重要程度进行排序,很大程度地避免了人为赋权的主观性。

(2)定量化程度较高 作为定性定量相结合的技术方法,突变级数法不仅可以对各地块是否适合其利用类型做出评价,还可以运用模型计算出各个地块生态适宜度的具体数值,对不同地块的生态适宜性程度进行定量的对比。

诚然,这里需要客观地指出,在按指标重要程度排序的过程、以及评价指标量化分级的过程中,突变级数法仍然不能完全避免人为主观性,这也需要今后继续探索整合其他技术方法,加以进一步完善。

5 结论

《开发区区域环境影响评价技术导则》(HJ/T2003)已将生态适宜度评价列为区域环境影响评价的主要内容,并明确提出了三级指标集成的技术要求。在镇江新区环评的案例分析中,突变级数法表现出在生态适宜度评价方面较好的适用性。通过与目前运用较多的排列成比较技术、层次分析法、模糊评价法等方法的数理对比,突变级数法更是体现出客观性较强、定量化程度较高的比较优势,应于进一步完善后加以推广。

References:

- [1] Fan Q, Li S F, Shi Y L, *et al.* Application of ecological suitability assessment in environmental impact assessment of development area and environmental planning. *Ecological Environment*, 2004, 23(2): 48 ~ 52.
- [2] Wang C R, Chen Y F, Lu G F. Ecological suitability assessment of Zhenjiang Development Zone by using analytic hierarchy process based on experts opinion. *Ecological Economics*, 2005, 10: 260 ~ 263.
- [3] Chen J F, Liu W M. An integrated evaluation of land suitability based on fuzzy set theory. *Resources Science*, 1999, 21(4): 71 ~ 74.

参考文献:

- [1] 范谦,李升峰,时亚楼,等.生态适宜度评价在开发区环评和环境规划中的应用. *生态环境*, 2004, 23(2): 48 ~ 52.
- [2] 王翠然,陈云峰,陆跟法.基于专家意见集成的层次分析法对镇江新区的生态适宜度评价研究. *生态经济*, 2005, 10: 260 ~ 263
- [3] 陈健飞,刘卫民. Fuzzy 综合评价在土地适宜性评价中的应用. *资源科学*, 1999, 21(4): 71 ~ 74.