

基于模糊推理的生态安全评估方法

通过引入模糊逻辑推理分析，改进传统的简单权重相加法、消去与选择转换法、逼近理想解排序法、协同博弈论和偏好序列组织法，开发模糊随机动态多判据综合诊断技术，实现对各个城市群复合生态系统及其中各功能区的生态承载力和生态脆弱性等一系列安全性特征的诊断和评价。其中，模糊逻辑推理分析可将多层式系统中多个要素间的重要性差异数值化，从而把多指标综合成一维空间的评估问题。多层式模糊随机动态多判据健康诊断技术包含由多个相互联系、相互补充、具有层次性和结构性的指标要素系列，可用于对各个城市群复合生态系统及其中各功能区的生态承载力和生态脆弱性等一系列安全特征进行诊断和评价。该诊断技术一方面可用于动态或短期评估，以对城市群生态健康状态进行快速、准确、整体的把握；另一方面可对不同生态管理方案情景进行中、长期的综合评估。由此，进一步为珠三角城市群生态风险的预测预警、生态安全格局的细化、生态安全控制线的划定以及生态功能区的分级控制提供科学支持。

针对城市群尺度生态安全研究较为缺乏以及研究时序不长且缺乏其过程和动态分析的研究现状，本研究以多层级珠三角城市群为研究对象，建立了一套 8 层次、54 个具体指标的城市群生态安全评价指标体系，并构建了生态安全预测模型，综合评价 2010—2027 年的生态安全状况以了解和掌握珠三角城市群生态安全的状况、趋势及空间分异，为地区生态安全维护与管理决策提供依据。

1. 评估指标

指标选取思路为，从生态安全评价对象“人口- 资源- 环境- 经济”复合巨系统出发，用社会指标、经济指标、资源指标、环境指标来度量区域生态安全。本项目遵循科学性、主导性、代表性、层次性、完备性、动态性与静态性相结合、可比性、可操作性、区域性等原则，构建了一套科学、合理的生态安全评估指标体系。项目组采用了多系统评价指标体系的建立模式，根据影响生态安全的不同分类建立指标体系，从社会经济环境影响方面分类全面考察了可反映珠三角多层式生态安全的影响因子，最终选取了人口社会、资源用量、生态用地、大气环境、水体环境、固体废物、经济指标、环境其他等 8 大类 54 个指标构成了多层级生态安全评价指标体系，如表 1 所示。

表 1 生态安全评估指标体系

类别	序号	指标	属性
1.人口&社会	1	人口密度	-
	2	人口自然增长率	-
	3	各市年末户籍人口数	-
	4	城镇化	-
	5	城镇登记失业率	-
	6	万人口普通高校在校学生数	+
	7	万人口中小学生在学生数	+
	8	规模以上企业万人 R&D 活动	+
	9	千人卫生技术人员	+
	10	卫生机构数	+
	11	城镇恩格尔系数	-
	12	人均道路面积	+
	13	人均住房面积	+
2.资源	14	人均水资源量	+
	15	用水量/水资源总量	+
	16	万元 GDP 用水量	-
	17	原煤消耗比例	-
	18	万元 GDP 能耗	-
3.用地	19	人均耕地面积	+
	20	人均公共绿地面积	+
	21	森林覆盖率	+
	22	建成区绿化覆盖率	+
	23	灌木林面积	+
4.大气环境	24	万元 GDP SO ₂ 排放强度	-
	25	万元 GDP 烟尘排放强度	-
	26	空气综合污染指数	-
	27	酸雨频率	-
	28	年平均降水量	+
	29	年平均气温	+
5.水体环境	30	万元 GDP 废水排放量	-
	31	饮用水质达标率	+
	32	工业废水达标处理率	+
	33	城市生活污水处理率	+
6.固废	34	万元 GDP 固废排放强度	-
	35	工业固体废物处置利用率	+
	36	生活垃圾无害化处理率	+
7.经济	37	城镇人均可支配收入	+
	38	人均固定资产投资额	+
	39	人均 GDP	+

	40	经济密度	+
	41	城市基础设施投资	+
	42	研究与发展经费占 GDP 比例	+
	43	第三产业占 GDP 比例	+
	44	第二产业占 GDP 比例	-
8.环境其他	45	化肥施用实物量	-
	46	农药施用量	-
	47	成灾面积占受灾面积比例	-
	48	灾害直接经济损失	-
	49	大陆海岸线长度	+
	50	水域面积率	+
	51	水土流失治理面积	+
	52	道路交通噪声监测等效声级	-
	53	区域环境噪声等效声级	-
	54	道路交通噪声路段超标率	-

2. 指标权重

本项目采用主观赋权法中最有代表性的层次分析法来确定综合效益评价指标的权重。主观赋权方法的优点是专家可以根据实际问题，较为合理地确定各指标之间的排序，也就是说尽管主观赋权法不能准确地确定各指标的权系数，但在通常情况下，主观赋权法可以在一定程度上有效地确定各指标按重要程度给定的权系数的先后顺序。指标权重的具体计算过程如下：

(1)确定目标和评价因素

将上述54个生态安全评估指标，依次表达为 $u = \{u_1, u_2, \dots, u_{54}\}$ 。

(2)构造判断矩阵

构造判断矩阵元素的值反映专家对各元素相对重要性的认识，即针对生态安全，判断两个指标的相对重要性。每次取两个因子 u_i 和 u_j ，以 u_{ij} 表示 u_i 和 u_j 对生态安全的影响大小之比。用1—9及其倒数对其相对重要性进行标度，标度具体含义如表 2所示。

表 2 标度含义

标度	含义
1	表示两个元素相比，具有同样重要性
3	表示两个元素相比，前者比后者稍重要
5	表示两个元素相比，前者比后者明显重要
7	表示两个元素相比，前者比后者强烈重要
9	表示两个元素相比，前者比后者极端重要
2, 4, 6, 8	表示上述相邻判断的中间值
倒数	若元素 <i>i</i> 与 <i>j</i> 的重要性之比为 a_{ij} ，那么元素 <i>j</i> 与元素 <i>i</i> 重要性之比为 $a_{ji}=1/a_{ij}$

由此即可得到两两比较判断矩阵 $S=(u_{ij})_{54\times 54}$ 。

$$S=\begin{bmatrix} \frac{w_1}{w_1} & \frac{w_1}{w_2} & \cdots & \frac{w_1}{w_n} \\ w_1 & w_2 & & w_n \\ \frac{w_2}{w_1} & \frac{w_2}{w_2} & \cdots & \frac{w_2}{w_n} \\ w_1 & w_2 & & w_n \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ \frac{w_n}{w_1} & \frac{w_n}{w_2} & \cdots & \frac{w_n}{w_n} \\ w_1 & w_2 & & w_n \end{bmatrix}$$

其中 $u_{ij}=w_i/w_j$ 。该判断矩阵满足(a) $u_{ij}>0$; (b) $u_{ij}=1/u_{ji}$ 的性质，即一个 n 个元素的判断矩阵只需要给出其上(或下)三角的 $n(n-1)/2$ 个元素就可以了，即只需做 $n(n-1)/2$ 个比较判断即可。本项目中各指标两两比较的判断矩阵结果如表 3 所示。

表 3 生态安全指标判断矩阵

	u1	u2	u3	u4	u5	...	U54
u1		1	3	4	1	...	54
u2			3	4	2	...	2
u3				1	5	...	3
u4					1	...	4
u5							5
...					
U54							

(3) 指标权重计算

基于判断矩阵可利用加和法、几何平均法、特征根法、对数最小二乘法、最小二乘法等多种方法进一步计算因素权重。本项目选用几何平均法：

将各个行向量进行几何平均，然后归一化，得到的行向量就是权重向量。其公式为：

$$\omega_i = \frac{(\prod_{j=1}^n a_{ij})^{\frac{1}{n}}}{\sum_{k=1}^n (\prod_{j=1}^n a_{kj})^{\frac{1}{n}}} \quad i = 1, 2, \dots, n$$

计算步骤如下：

第一步：各因素按列相乘得一新向量；

第二步：将新向量的每个分量开 n 次方；

第三步：将所得向量归一化后即为权重向量。

由表 4 可知，54 项指标因子的权重向量为： $W=[w_1, w_2, w_3, \dots, w_{54}]T$ 。

表 4 生态安全指标权重

归一后权重	
u1	w_1
u2	w_2
u3	w_3
u4	w_4
u5	w_5
...	...
U54	w_{54}

(3)判断矩阵的一致性检验

上述构造成对比较判断矩阵的办法虽能减少其它因素的干扰，较客观地反映出对因子影响力的差别。在判断矩阵的构造中，并不要求判断具有传递性和一致性，即不要求 $u_{ij} \times u_{jk} = u_{ik}$ 严格成立，这是由客观事物的复杂性与人的认识的多样性所决定的。。但要求判断矩阵满足基本的一致性。如果出现“甲比乙极端重要，乙比丙极端重要，而丙又比甲极端重要”的判断，则显然是违反常识的，一个混乱的经不起推敲的判断矩阵有可能导致决策上的失误。为保证其权重赋值的可靠性，还需对其一致性进行检验。一致性检验的具体步骤如下：

a. 计算一致性计算指标(consistency index):

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1}$$

其中 λ_{\max} 为判断矩阵 S 的最大特征根, n 为因素个数。

b. 查找相应的平均随机一致性指标 RI , 见表 5:

表 5. 平均随机一致性指标

矩阵阶数	1	2	3	4	5	6	7	8
RI	0	0	0.52	0.89	1.12	1.26	1.36	1.41
矩阵阶数	9	10	11	12	13	14	15	
RI	1.46	1.49	1.52	1.54	1.56	1.58	1.59	

λ_{\max} , 及其对应的特征向量 A , 此特征向量就是各评价因素的重要性排序, 也即是权系数的分配。

c. 计算一致性比例 CR (consistency ratio) :

$$CR = \frac{CI}{RI}$$

当 $CR < 0.1$ 时, 认为判断矩阵的一致性是可以接受的; 当 $CR \geq 0.1$ 时, 应该对判断矩阵做适当修正。本项目所建立的指标体系中, 判断矩阵特征向量 $\lambda_{\max} = 10.11$, $n = 10$, $CI = 0.01$, $RI = 1.49$, 计算可知 $CR < 0.1$, 符合一致性检验。

由此可知每个指标的权重可合理分配为 w_i 。

3. Mamdani 模糊推理综合评估模型

模糊综合分析是常见的综合评估方法之一。本项目选用基于模糊推理理论构建了生态安全评估模型。模糊推理的结论主要取决于模糊蕴含关系 $\tilde{R}(X, Y)$ 及模糊关系与模糊集合之间的合成运算法则。对于确定的模糊推理系统, 模糊蕴含关系 $\tilde{R}(X, Y)$ 一般是确定的, 而合成运算法则并不唯一。Mamdani 推理法是最常用的一种推理方法, 其模糊蕴涵关系 $\tilde{R}_M(X, Y)$ 定义简单, 可以通过模糊集合 \tilde{A} 和 \tilde{B} 的笛卡尔积(取小)求得, 即:

$$\mu_{\tilde{R}_M}(x, y) = \mu_{\tilde{A}}(x) \wedge \mu_{\tilde{B}}(y)$$

Mamdani 将经典的极大—极小合成运算方法作为模糊关系与模糊集合的合成运算法则。对于具有单个前件的运算，设 \tilde{A}^* 和 \tilde{A} 论域 x 上的模糊集合， \tilde{B} 是论域 y 上的模糊集合， \tilde{A} 和 \tilde{B} 间的模糊关系是 $\tilde{R}_M(X,Y)$ ，有：

大前提(规则): if x is \tilde{A} then y is \tilde{B}

小前提(事实): x is \tilde{A}^*

结论: y is $\tilde{B}^* = \tilde{A}^* \circ \tilde{R}_M(X,Y)$

当 $\mu_{\tilde{R}_M}(x,y) = \mu_{\tilde{A}}(x) \wedge \mu_{\tilde{B}}(y)$ 时，有

$$\begin{aligned}\mu_{\tilde{B}^*}(y) &= \bigvee_{x \in X} \{ \mu_{\tilde{A}^*}(x) \wedge [\mu_{\tilde{A}}(x) \wedge \mu_{\tilde{B}}(y)] \} \\ &= \bigvee_{x \in X} \{ [\mu_{\tilde{A}^*}(x) \wedge \mu_{\tilde{A}}(x)] \wedge \mu_{\tilde{B}}(y) \} \\ &= \omega \wedge \mu_{\tilde{B}}(y)\end{aligned}$$

其中 $\omega = \bigvee_{x \in X} [\mu_{\tilde{A}^*}(x) \wedge \mu_{\tilde{A}}(x)]$ ，称为 \tilde{A} 和 \tilde{A}^* 的适配度。

在给定模糊集合 \tilde{A}^* 、 \tilde{A} 及 \tilde{B} 的情况下，Mamdani 模糊推理的结果 \tilde{B}^* 如图 1 所示。

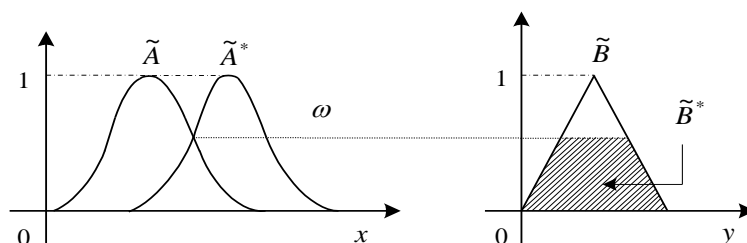


图 1. 单前提单规则的推理过程

根据 Mamdani 推理方法可知，欲求 \tilde{B}^* ，应先求出适配度 ω (即 $\mu_{\tilde{A}^*}(x) \wedge \mu_{\tilde{A}}(x)$ 的最大值)；然后用适配度 ω 去切割 \tilde{B} 的 MF，即可获得推论结果 \tilde{B}^* ，如图 1 中后件部分的阴影区域。所以这种方法经常又形象地称为削顶法。

对于单前件单规则(即若 x 是 \tilde{A} 则 y 是 \tilde{B})的模糊推理，当给定事实 x 是精确量 x_0 时，基于 Mamdani 推理方法的模糊推理过程见下图。

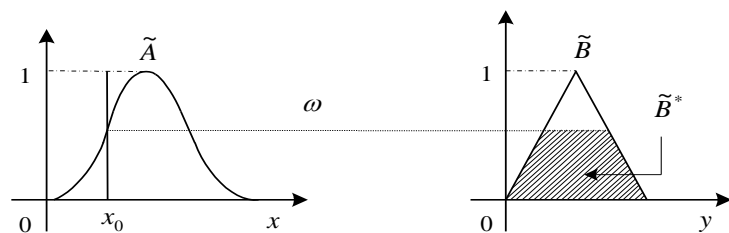


图 2.事实为精确量时的单前提单规则推理过程

在可持续发展观的指导下，建立科学的生态安全评价指标体系，对决策者和生态系统的管理者具有切实的指导作用，对广大社会公众具有教育意义以及对公众的行为选择和行为调整具有指导意义，从而化解除各类生态危机和潜在的生态风险，促进经济、社会 and 环境的协调发展，实现生态系统与人类的可持续发展。