

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2008.05.027

# 固体废弃物生态处理系统可拓模糊综合评价模型

张乾飞,王艳明

(上海市政工程设计研究总院,上海 200092)

**摘要:**为对城市固体废弃物生态处理系统的生态状况进行评价,将可拓学和模糊数学理论相结合,对固体废弃物生态处理系统生态健康综合评价中评价体系的构建、评价指标的度量、综合评价的物元模型、综合评价的可拓方法等几个关键技术进行了研究,建立了生态健康可拓模糊综合评价模型.将该模型应用于填埋工艺生态性分析,结果表明该模型是合理可行的.

**关键词:**固体废弃物;生态处理;生态健康;可拓模糊评价方法

**中图分类号:** X705      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1000-1980(2008)05-0707-06

固体废弃物生态处理系统是以固体废弃物的生态处理、处置为目标,根据不同的处理、处置工艺而建立起来的固体废弃物分类、收集、运输、中转、最终处置的生态系统.由于处理、处置工艺不同,相应固体废弃物的分类、收集、运输、中转系统也随之变化,各环节的生态指标、评价准则也不尽相同,因此固体废弃物生态处理系统是一个庞大的多层次、多目标、多体系的动态复杂生态系统.

在固体废弃物生态处理系统生态水平的评价方面,有关学者进行了大量的研究工作. Calvo 等<sup>[1]</sup>采用环境诊断法引入多因子指标体系对固体废弃物填埋场的环境卫生水平进行了综合评价;Kontoset 等<sup>[2]</sup>通过引入多准则分析法、地理信息系统、空间统计分析方法建立了环境时空评价模型,利用空间分析法创建评价准则,通过层次分析法确定相对权重,对固体废弃物生态处理系统的生态水平进行了评价;Costi 等<sup>[3]</sup>则建立了固体废弃物管理的决策支持系统,以帮助决策者选择合适的终端处置设施,提高处理设施的可持续发展水平;Crawford 等<sup>[4]</sup>基于以往历史数据,对固体废弃物生态处理系统生态健康水平的变化趋势进行了预测;Tukker 等<sup>[5-6]</sup>利用生命周期评估方法评价了处理设施对周边环境的影响.

由于系统的复杂性,以往针对单一体系的层次分析法、模糊评价法、加权平均法等简易评价模型,显然不能满足固体废弃物生态处理系统生态健康综合评价的要求.为此,有关学者尝试将可拓学和模糊数学理论相结合,借助物元分析方法,以实现对复杂系统的综合评价.王锦国等<sup>[7]</sup>利用可拓评价法对城市空气质量等级进行了评价,计算了相应的质量等级特征值.WU 等<sup>[8]</sup>则利用可拓模糊综合评价方法对大坝的健康水平进行了智能诊断,并根据诊断结果实现对大坝的实时监控.

本文针对固体废弃物生态处理系统多层次、多体系的特征,将可拓学和模糊数学理论相结合,对生态健康综合评价中评价体系的构建、评价指标的度量、综合评价的物元模型、综合评价的可拓方法等几个关键技术进行了研究,建立了基于模糊评价的生态健康可拓模糊综合评价模型.

## 1 可拓模糊综合评价基本思想

固体废弃物生态处理系统生态健康状况是质与量的统一体,它的变化有量变和质变之分.在进行生态健康综合评价过程中,既要考虑量的变化,也要考虑质的变化.从物元分析的观点出发<sup>[9]</sup>,与生态健康相关的每个研究对象可以用一个信息物元来表述,而多个研究对象按一定的结构可形成信息物元系统(生态健康综合评价体系),信息的处理过程则抽象为物元变换,并通过关联函数刻画研究对象具有某种特性的程度,实现从定性到定量的综合集成.

可拓方法的理论基础是物元理论和可拓集合论<sup>[10]</sup>,其逻辑细胞是质与量有机结合的物元,它是由事物、特征以及事物关于该特征的量值三者组成的三元组.物元概念正确反映了质与量之间的相互关系,可以更贴切地描述客观事物的变化过程.事物变化的可能性称为物元的可拓性.可拓评价方法的核心就是研究物元可拓性和物元变换的关系,最终实现评价目标与评价指标的有机关联.

生态系统可拓模糊综合评价模型采用菱形思维的评价模式.首先利用物元的可拓性对评价对象进行发散分析,再利用物元变换关系形成解决矛盾问题的多种方案.最后利用优度评价方法进行筛选,将反映生态健康状况的量变和质变有机结合起来,融合可拓理论<sup>[11-12]</sup>与固体废弃物生态处理领域的专业知识,通过对生态健康评价物元的可拓性和生态系统开拓规律与方法的研究,实现对质和量转换的处理,实现定性和定量相结合,最终形成适合于生态健康综合评价的方法.菱形思维是一种先发散后收敛的思维方式,具有开放性和可拓性,能够适应多体系动态复杂系统的评价要求.

可拓模糊综合评价方法的基本思想是:首先根据评价等级、事物性质及其数据特征,将待评价事物的质量分成若干等级,并确定各等级的集合范围;再将待评价事物的指标代入各等级的集合中进行多指标评定.评定结果按照待评价事物的指标与各等级集合的关联度大小进行比较,关联度越大,就表明待评价事件对该等级集合的隶属程度越大.

2 生态健康综合评价物元模型

2.1 生态健康评价物元

以生态健康综合评价体系中的研究对象为事物,评价指标为特征,指标规格化值为特征值,生态健康评价物元可用式(1)来描述:

$$R = (S, C, V) = \begin{bmatrix} S, C_1, v_1 \\ C_2, v_2 \\ \vdots \\ C_n, v_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \text{对象,评价指标 } I_1, I_1 \text{ 规格化值 } v_{I_1} \\ \text{评价指标 } I_2, I_2 \text{ 规格化值 } v_{I_2} \\ \vdots \\ \text{评价指标 } I_n, I_n \text{ 规格化值 } v_{I_n} \end{bmatrix} \tag{1}$$

2.2 生态健康评价经典域物元

根据生态健康综合评价等级标准,可得生态健康综合评价体系中研究对象的经典域物元:

$$R_{0j} = (N_{0j}, C_i, V_{0ij}) = \begin{bmatrix} N_{0j}, C_1, V_{01j} \\ C_2, V_{02j} \\ \vdots \\ C_n, V_{0nj} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} N_{0j}, C_1, \langle a_{01j}, b_{01j} \rangle \\ C_2, \langle a_{02j}, b_{02j} \rangle \\ \vdots \\ C_n, \langle a_{0nj}, b_{0nj} \rangle \end{bmatrix} \tag{2}$$

式中: $N_{0j}$ ——研究对象(如填埋工艺生态性)级别( $j = 1, 2, \dots, m$ ); $m$ ——所划级别数; $C_i$ ——生态健康综合评价体系中研究对象评价指标( $i = 1, 2, \dots, n$ ); $n$ ——生态健康综合评价体系中研究对象评价指标个数; $V_{0ij}$ —— $N_{0j}$ 关于 $C_i$ 所规定的量值范围,即各生态健康等级关于对象的评价指标所对应的规格化数据范围的经典域, $V_{0ij} = \langle a_{0ij}, b_{0ij} \rangle$ .

2.3 生态健康节域物元

$$R_P = (P, C_i, V_{Pi}) = \begin{bmatrix} P, C_1, V_{P1} \\ C_2, V_{P2} \\ \vdots \\ C_n, V_{Pn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P, C_1, \langle a_{p1}, b_{p1} \rangle \\ C_2, \langle a_{p2}, b_{p2} \rangle \\ \vdots \\ C_n, \langle a_{pn}, b_{pn} \rangle \end{bmatrix} \tag{3}$$

式中: $P$ ——研究对象等级的全体; $V_{Pi}$ ——生态健康综合评价体系中 $C_i$ 的所有取值范围,即 $P$ 的节域, $V_{Pi} = \langle a_{pi}, b_{pi} \rangle$ .

2.4 生态健康待评物元

对生态健康综合评价体系中待评的对象 $N$ (如填埋工艺生态性),将某时期(时刻) $t$ 实际的的分析结果用式(4)表示,称为生态健康综合评价体系中研究对象 $N$ 的待评物元 $R_t(N, C, \alpha(t))$ :

$$R(N,C_i,v_i(t))=\begin{bmatrix} N,C_1,v_1(t) \\ C_2,v_2(t) \\ \vdots \\ C_n,v_n(t) \end{bmatrix} \tag{4}$$

式中： $N$ ——生态健康综合评价体系中待评对象； $v_i(t)$ ——某时期（或某时刻） $t$  的  $C_i$  规格化值。

3 生态健康可拓模糊综合评价方法

生态健康可拓模糊综合评价的依据是生态健康评价物元的可拓性，核心是生态健康状况可拓域的确定，实现手段是可拓域中元素的物元变换。

3.1 评价指标等级标准

在建立物元模型时，应将评价指标划分为若干个不同等级，并对各等级赋予简明的评语。等级过少，评价将过于粗略，等级过多，又会增加确定界限的难度。本文将评价指标分为 5 个等级，即  $V=\{V_1,V_2,V_3,V_4,V_5\}=\{\text{I 级},\text{II 级},\text{III 级},\text{IV 级},\text{V 级}\}=\{\text{优良},\text{较好},\text{中等},\text{较差},\text{恶化}\}$ 。

本文分级标准适用于生态健康综合评价体系中所有指标，包括各底层和中上层指标。以填埋工艺生态评价为例，将填埋作业、渗沥液、防渗系统、填埋气、监测维护、终场修复、设备设施、环境保护等作为研究对象（填埋工艺生态性）的评价指标，相应的分级标准如表 1 所示。

表 1 评价指标等级标准  
Table 1 Grade scales of evaluation indices

| 填埋工艺生态性态 |                 | 评价指标模糊隶属度 |         |         |         |         |         |         |         |
|----------|-----------------|-----------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
|          |                 | 填埋作业      | 渗沥液     | 防渗系统    | 填埋气     | 监测维护    | 封场修复    | 设备设施    | 环境保护    |
| 优良       | I 级 ( $V_1$ )   | 0~0.2     | 0~0.2   | 0~0.2   | 0~0.2   | 0~0.2   | 0~0.2   | 0~0.2   | 0~0.2   |
| 较好       | II 级 ( $V_2$ )  | 0.2~0.4   | 0.2~0.4 | 0.2~0.4 | 0.2~0.4 | 0.2~0.4 | 0.2~0.4 | 0.2~0.4 | 0.2~0.4 |
| 中等       | III 级 ( $V_3$ ) | 0.4~0.6   | 0.4~0.6 | 0.4~0.6 | 0.4~0.6 | 0.4~0.6 | 0.4~0.6 | 0.4~0.6 | 0.4~0.6 |
| 较差       | IV 级 ( $V_4$ )  | 0.6~0.8   | 0.6~0.8 | 0.6~0.8 | 0.6~0.8 | 0.6~0.8 | 0.6~0.8 | 0.6~0.8 | 0.6~0.8 |
| 恶化       | V 级 ( $V_5$ )   | 0.8~1.0   | 0.8~1.0 | 0.8~1.0 | 0.8~1.0 | 0.8~1.0 | 0.8~1.0 | 0.8~1.0 | 0.8~1.0 |

3.2 生态健康综合评价指标度量

生态健康综合评价指标体系中底层指标的原始数值取值范围、度量方法和度量单位各不相同，既有定性特征值，又有定量特征值，它们之间不存在可比性。因此，在进行可拓评价之前，应将底层指标的原始数据转化到 0~1 的无量纲可比较数值范围内，且规定数值越小，表示对生态健康越有利。这一过程称为原始数据规格化。

3.2.1 级别特征值规格化

在生态健康综合评价体系中，中间层元素既是上层元素的特征，又是下层元素的事物（研究对象）。作为事物，中间层元素对应的原始数值是级别特征值。如填埋，它经过分类收集、中转运输、填埋工艺等可拓评价，判别出填埋生态性态属 II 级，级别特征值为 2.35。对级别特征值规格化：

$$v=\frac{\tilde{v}-1}{m} \tag{5}$$

式中： $\tilde{v}$ ——底层指标可拓评价级别特征值； $m$ ——可拓评价对象生态性态分级数，如将填埋生态健康性态分为 5 级：优良、较好、中等、较差、恶化，此时  $m=5$ ； $v$ ——底层指标可拓评价级别特征值规格化值。

3.2.2 底层定量指标的原始数据规格化

底层指标是指生态健康综合评价体系中再无下层元素的指标。底层指标分为定量指标和定性指标。定量指标的度量建立在对指标进行单因素分析基础之上，可采用如下方法进行原始数据规格化：

在生态健康综合评价指标中，指标过大或过小，都对生态不利，因此在分区时，宜考虑双边的情况。如图 1(a) 所示的指标如水质等，只有在数值偏大时才会有问题，这时分区宜只考虑偏大的单边情况，如图 1(b) 所示。根据图 1 所示的原始数据分区，考虑生态系统的特点，底层定量指标初始隶属度值的分级标准如表 2 所示。表 2 中  $s_{j1},s_{j2}\in[0,1.0](j=1,2,3,4,5)$ 。

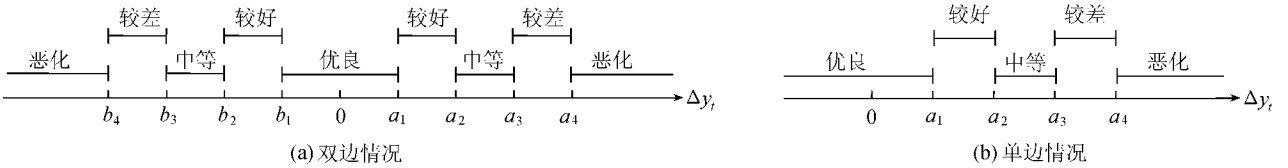


图1 底层定量指标分区示意图

Fig.1 Sketch of partition of bottom quantitative index

3.3 指标权重

生态健康评价体系是一个多层次结构,每个层次中又有多个评价指标.要对整个生态健康状况进行综合评价,需要对各层元素进行评价,并将评价结果进行综合.由于各评价指标在生态健康状况评价中的地位、作用不同,因此它们对整个生态健康综合评价的贡献也不同.如果仅将各评价指标的评价结果简单地综合,以此来代表整个生态系统的健康状况,则有可能会得出失真的结论.为此,应当分别确定同一层次中各指标在生态健康综合评价体系中对于上层研究对象的“相对重要性”——赋权,然后综合考虑各指标的权重与其评价结果,才能得出对其上层研究对象合理的评价.如此逐步递归,直至得到整个生态健康系统的综合评价结果.

设生态健康综合评价指标  $C_i$  的权系数为  $\alpha_i$ ,应满足如下条件:

$$\sum_{i=1}^n \alpha_i = 1$$

(6)

式中  $\alpha_i$  为  $C_i$  的权重值.

3.4 生态健康等级确定

3.4.1 生态健康综合评价单指标关联度

生态健康综合评价体系中待评对象  $N$  的第  $i$  个评价指标关于健康级别  $j$  的关联度由式(7)求得.

$$K_j(v_i(t)) = \begin{cases} \frac{\rho(v_i(t), V_{0ij})}{\rho(v_i(t), V_{pi}) - \rho(v_i(t), V_{0ij})} & (\rho(v_i(t), V_{pi}) - \rho(v_i(t), V_{0ij}) \neq 0) \\ -\rho(v_i(t), V_{0ij}) - 1 & (\rho(v_i(t), V_{pi}) - \rho(v_i(t), V_{0ij}) = 0) \end{cases} \quad (7)$$

$$\rho(v_i(t), V_{0ij}) = \left| v_i(t) - \frac{a_{0ij} + b_{0ij}}{2} \right| - \frac{b_{0ij} - a_{0ij}}{2}$$

$$\rho(v_i(t), V_{pi}) = \left| v_i(t) - \frac{a_{pi} + b_{pi}}{2} \right| - \frac{b_{pi} - a_{pi}}{2}$$

3.4.2 生态健康综合评价多指标综合关联度

生态健康综合评价体系中待评价对象  $N$  关于生态健康级别  $j$  的关联度为

$$K_j(N) = \sum_{i=1}^n \alpha_i K_j(v_i)$$

(8)

3.4.3 生态健康等级评定

若

$$K_{j_0}(N) = \max_{j \in \{1, 2, \dots, m\}} (K_j(N))$$

(9)

则评定生态健康综合评价体系中待评价对象  $N$  属于等级  $j_0$ . 令

$$\bar{K}_j(N) = \frac{K_j(N) - \min_j (K_j(N))}{\max_j (K_j(N)) - \min_j (K_j(N))}$$

(10)

$$j^* = \frac{\sum_{j=1}^m j \bar{K}_j(N)}{\sum_{j=1}^m \bar{K}_j(N)}$$

(11)

表2 底层指标初始隶属度值分级标准

Table 2 Grade scale of initial membership degree of bottom index

| 级别     | 分级标准                               | 常规分级标准     |
|--------|------------------------------------|------------|
| I 优良   | (s <sub>11</sub> s <sub>12</sub> ) | (0.0, 0.2) |
| II 较好  | (s <sub>21</sub> s <sub>22</sub> ) | (0.2, 0.4) |
| III 中等 | (s <sub>31</sub> s <sub>32</sub> ) | (0.4, 0.6) |
| IV 较差  | (s <sub>41</sub> s <sub>42</sub> ) | (0.6, 0.8) |
| V 恶化   | (s <sub>51</sub> s <sub>52</sub> ) | (0.8, 1.0) |

则称  $j^*$  为  $N$  所属健康级别的特征值.

4 算 例 应 用

利用生态健康综合评价物元模型对填埋工艺生态性进行应用分析. 评价填埋工艺生态性的指标有填埋作业、渗沥液、防渗系统、填埋气、监测维护、终场修复、设备设施、环境保护等 8 个. 考虑这些指标已经经过规格化处理, 评价等级分为 5 级. 根据表 1 相应的同征物元体(经典域)为:

$$R_0 = \begin{bmatrix} N & N_1 & N_2 & N_3 & N_4 & N_5 \\ C_1 & [0.0.2] & [0.2.0.4] & [0.4.0.6] & [0.6.0.8] & [0.8.1.0] \\ C_2 & [0.0.2] & [0.2.0.4] & [0.4.0.6] & [0.6.0.8] & [0.8.1.0] \\ C_3 & [0.0.2] & [0.2.0.4] & [0.4.0.6] & [0.6.0.8] & [0.8.1.0] \\ C_4 & [0.0.2] & [0.2.0.4] & [0.4.0.6] & [0.6.0.8] & [0.8.1.0] \\ C_5 & [0.0.2] & [0.2.0.4] & [0.4.0.6] & [0.6.0.8] & [0.8.1.0] \\ C_6 & [0.0.2] & [0.2.0.4] & [0.4.0.6] & [0.6.0.8] & [0.8.1.0] \\ C_7 & [0.0.2] & [0.2.0.4] & [0.4.0.6] & [0.6.0.8] & [0.8.1.0] \\ C_8 & [0.0.2] & [0.2.0.4] & [0.4.0.6] & [0.6.0.8] & [0.8.1.0] \end{bmatrix}$$

生态健康节域物元为

$$R_p = (P, C, V_p) = \begin{bmatrix} P \\ C_1 & C_2 & C_3 & C_4 & C_5 & C_6 & C_7 & C_8 \\ [0.1.0] & [0.1.0] & [0.1.0] & [0.1.0] & [0.1.0] & [0.1.0] & [0.1.0] & [0.1.0] \end{bmatrix}^T$$

以上海老港填埋场和苏州七子山填埋场的生态填埋程度为例进行分析. 上海老港填埋场四期工程于 2005 年建成, 具有双层防渗衬垫系统和完善的设施; 七子山填埋场建于 1993 年, 没有铺设水平防渗衬垫系统, 管理运作水平较低, 还不能达到现代卫生填埋场的建设标准. 通过现场调查分析和专家评估, 相应的生态健康待评物元为

$$R_i = \begin{bmatrix} p & C_1 & C_2 & C_3 & C_4 & C_5 & C_6 & C_7 & C_8 \\ p_1 & 0.25 & 0.2 & 0.1 & 0.4 & 0.3 & 0.4 & 0.2 & 0.2 \\ p_2 & 0.60 & 0.7 & 0.8 & 0.7 & 0.65 & 0.6 & 0.75 & 0.8 \end{bmatrix}^T$$

式中:  $p_1$ ——老港填埋场,  $p_2$ ——七子山填埋场.

采用动态赋权技术得到的权重矩阵如下:

$$W = \begin{bmatrix} p & W_1 & W_2 & W_3 & W_4 & W_5 & W_6 & W_7 & W_8 \\ p_1 & 0.136 & 0.063 & 0.125 & 0.200 & 0.150 & 0.200 & 0.063 & 0.063 \\ p_2 & 0.071 & 0.095 & 0.190 & 0.095 & 0.143 & 0.071 & 0.145 & 0.190 \end{bmatrix}^T \tag{12}$$

根据式(12), 用式(7)~(11)进行计算, 可得到不同填埋工艺生态健康评价结果, 如表 3 所示.

由评价结果可以看出, 老港填埋场的生态健康水平要比七子山填埋场高, 这与 2 个填埋场的实际情况是一致的.

5 结 论

a. 生态健康性态分层次多指标的评价体系是物元可拓性和菱形思维方法的集中体现, 这两者是可拓学用来解决矛盾问题的依据和思路.

b. 基于可拓学和模糊数学理论的生态健康综合评价方法, 是利用物元的可拓性和初始模糊隶属函数, 将可拓理论与模糊数学结合起来, 对生态健康评价这样的复杂系统问题, 进行多层次、多指标的扩散, 然后从底层开始, 运用可拓评价方法对底层指标初始模糊隶属函数值刻画的特征值进行逐层递归运算, 最后收敛得到生态健康整体的级别和特征值.

表 3 填埋工艺生态评价结果

Table 3 Results of ecological health evaluation of different landfills

| 待评物元  | 健康级别 | 级别特征值 |
|-------|------|-------|
| $p_1$ | 2    | 2.123 |
| $p_2$ | 4    | 3.892 |

c. 算例表明 利用可拓理论对生态健康状况进行模糊综合评价是合理可行的 ,且具有一定的通用性.

#### 参考文献:

- [ 1 ] CALVO F ,MORENO B ,SZANTO M Z. Environmental diagnosis methodology for municipal waste landfills[ J ]. Waste Management 2005 , 25( 8 ) :768-779.
- [ 2 ] KONTOSSET T D ,KOMILIS D P ,HALVADAKIS C P. Siting MSW landfills with a spatial multiple criteria analysis methodology[ J ]. Waste Management 2005 25( 8 ) 818-832.
- [ 3 ] COSTI P ,MINCIARDI R ,ROBBA M ,et al. An environmentally sustainable decision model for urban solid waste management[ J ]. Waste Management 2004 24( 3 ) 277-295.
- [ 4 ] CRAWFORD D W ,BONNEVIE N L ,GILLIS C A ,et al. Historical changes in the ecological health of the Newark Bay estuary ,New Jersey [ J ]. Ecotoxicology and Environmental Safety ,1994 29( 3 ) 276-303.
- [ 5 ] TUKKER A. Life cycle assessment as a tool in environmental impact assessment[ J ]. Environmental Impact Assessment Review 2000 20 ( 4 ) 435-456.
- [ 6 ] MENDES M R ,ARAMAKI T ,HANAKI K. Comparison of the environmental impact of incineration and landfilling in São Paulo City as determined by LCA[ J ]. Resources ,Conservation and Recycling 2004 41( 1 ) 47-63.
- [ 7 ] 王锦国 张乾飞 袁永生. 城市空气质量综合评价的可拓方法[ J ]. 中国环境监测 2001 ,17( 6 ) 47-49.
- [ 8 ] WU Zhong-ru ,SU Huai-zhi. Dam health diagnosis and evaluation[ J ]. Smart Mater Struct 2005 ,14( 增刊 ) :130-136.
- [ 9 ] 蔡文. 物元模型及其应用[ M ]. 北京 科学技术文献出版社 ,1994.
- [ 10 ] 蔡文. 从物元分析到可拓学[ M ]. 北京 科学技术文献出版社 ,1995.
- [ 11 ] 蔡文 杨春燕 林伟初. 可拓工程方法[ M ]. 北京 科学出版社 ,1997.
- [ 12 ] 杨春燕 蔡文. 可拓工程研究[ J ]. 中国工程科学 2000 2( 12 ) 90-96.

## Extensible fuzzy comprehensive evaluation model for a municipal solid waste ecological treatment system

ZHANG Qian-fei , WANG Yan-ming

( Shanghai Municipal Engineering Design General Institute , Shanghai 200092 , China )

**Abstract :** A municipal solid waste ecological treatment system is a complex system with multiple objectives and a multi-level hierarchy. Through a combination of the extension method and fuzzy theory , some key technologies in the comprehensive evaluation of ecological health , such as construction of an evaluation system , quantification of evaluation indices , a matter-element model and an extension evaluation method , were studied. Then , an extensible fuzzy comprehensive evaluation model of ecological health was established. The application of the model to landfill analysis shows that the model is reasonable and feasible.

**Key words :** municipal solid waste( MSW ); ecological treatment ; ecological health ; extensible fuzzy evaluation method