

# 改进 AHP—灰色关联分析的给水厂排泥水处理工艺优选模型

张 勤<sup>a,b</sup>, 华 佩<sup>a,b</sup>, 张 晋<sup>a,b</sup>

(重庆大学 a. 城市建设与环境工程学院; b. 三峡库区生态环境教育部重点实验室, 重庆 400045)

**摘 要:** 针对目前给水厂排泥水处理工艺流程甄选过程中存在的若干问题, 以灰色关联分析为骨架建立给水厂排泥水处理工艺优选模型。通过最优传递矩阵对传统层次分析法进行改进, 解决了传统层次分析法判断矩阵一致性修正的难题, 并采用改进的层次分析法确定模型权重分配集合。以重庆某电厂净水站排泥水处理工艺设计为实例, 介绍该模型的计算流程以及评价方法, 并运用模型对工艺流程进行评判, 得出适合该电厂净水站排泥水处理的最优工艺。

**关键词:** 改进层次分析法; 灰色关联分析法; 最优传递矩阵; 排泥水处理工艺

**中图分类号:** TU991.2    **文献标志码:** A    **文章编号:** 1674-4764(2010)03-0133-05

## Improved AHP Assessment and Grey Relational Analysis Model for Optimizing Waterworks Sludge Treatment Process

ZHANG Qin<sup>a,b</sup>, HUA Pei<sup>a,b</sup>, ZHANG Jin<sup>a,b</sup>

(a. Faculty of Urban Construction and Environmental Engineering, Chongqing University, b. Key Laboratory of Eco-environments in Three Gorges Reservoir Region, Ministry of Education, Chongqing 400045, P. R. China)

**Abstract:** The goal of AHP-Grey Relational Analysis model is to solve problems during selecting the best waterworks sludge treatment process. And grey Relational Analysis is to confirm the compactness between the ideal process and candidate process. Moreover, weighting system was determined by the three-mark matrix and consistency analysis of judgment matrix for traditional AHP was improved by the optimum transfer matrix. Base on these theories, AHP-GRA model was established. A case study was addressed with the selection of waterworks sludge treatment process in Chongqing. It is found that this model is legitimate and credible.

**Key words:** improved analytic hierarchy process; grey relational analysis; transfer matrix method; supply water sewage treatment

给水厂在生产洁净水的同时, 也产生了大量的生产废水, 其主要来自沉淀池或澄清池排泥水及滤池反冲洗排泥水, 水量约占水厂总净水量的 3~7%<sup>[1]</sup>。在当前水环境污染日益恶化, 水资源紧缺日益严重的情况下, 有必要对排泥废水实施处理, 并回收利用这部分水资源, 从而减少水源污染、并在一定

程度上缓解水资源紧缺的矛盾。因此, 根据工程实际确定一个合理、高效的排泥水处理工艺流程就显得尤为重要。工艺流程的确定涉及到社会、经济、环境等诸因素的影响, 即多因素决策问题。灰色关联分析是一种多因素统计分析方法, 它是以前各因素的样本数据为依据, 用灰色关联度来描述因素间关系

收稿日期: 2009-12-20

基金项目: 重庆市科委重点攻关项目(CSCT, 2007A D7036)

作者简介: 张勤(1957-), 男, 教授, 硕士生导师, 主要从事给水处理理论研究, (E-mail) cq\_zhangqin@163.com。

的强弱、大小和次序,已在社会、经济、农业等复杂系统多因素决策和工程技术综合评价中得到应用。然而,目前国内排泥水处理工艺的确定是以经济技术分析为主的单因素评价方法,缺乏多因素地、全面地评价体系,使得选定的待选方案难以实现全局最优。

针对上述排泥水处理工艺流程在甄选过程中存在的问题,运用灰色关联分析理论,以“重庆某电厂零排放项目”为工程背景,建立排泥水处理工艺优选模型。并引用最优传递矩阵对传统层次分析法进行改进,进而采用改进的层次分析法确定模型中各因素权重分配集合,实现改进层次分析与灰色关联分析法的结合,并以此模型对几种排泥水处理组合工艺流程进行系统地、定量地、全面地评价,确定适合该电厂净水站排泥水处理的最优工艺。

## 1 改进层次分析法

层次分析法 (Analytic Hierarchy Process)<sup>[2-3]</sup>,是一种应用于复杂系统综合评价中确定权重的重要方法。然而传统的层次分析法采用 1~9 比例标度法则构建判断矩阵,存在判断差异不明显,判断标度不易确定的问题,使得判断矩阵的不一致性极易发生。由此衍生出判断矩阵一致性检验、修正,以及修正不当所导致的权重集合分配的不稳定性、失真性等问题。

该文采用基于拟优传递矩阵的改进 AHP,在构造判断矩阵时,采用 3 标度比例法则,并在构造判断矩阵的过程中引入最优传递矩阵<sup>[4-5]</sup>,使得判断矩阵能自然满足一致性要求。省略传统层次分析法一致性检验及对传统判断矩阵的反复调整,克服了传统 AHP 的弊端。

### 1.1 建立递阶层次分析结构模型

给水厂排泥水工艺流程的设计优选是一个复杂的系统工程,它涉及社会、经济、环境等多个领域,而每个领域又受到多个子项因素的影响。为使整个系统条理化、层次化,将系统涉及的诸因素按照相互支配及隶属关系,构造层次结构模型。

首先,确定系统的目标层是排泥水处理工艺综合最优方案。其次,分析综合最优方案实现所涉及的各种经济、环境、管理因素,确定系统的准则层(指标层)。并按照各因素间互相支配或隶属关系分成若干子层。

### 1.2 构造判断矩阵

根据层次结构模型,运用成对比较法和 3 标度比例法则(见表 1),构造各层对上 1 层每一因素的成对比较判断矩阵  $A$ :

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1j} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2j} & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ a_{i1} & a_{i2} & \cdots & a_{ij} & \cdots & a_{in} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \cdots & a_{nj} & \cdots & a_{nn} \end{bmatrix}$$

表 1 元素重要程度的比较值

| $i, j$ 两元素对比的重要性等级 | $a_{ij}$ | $a_{ji}$ |
|--------------------|----------|----------|
| $i, j$ 两元素重要性相同    | 0        | 0        |
| $i$ 元素比 $j$ 元素重要性强 | 1        | -1       |

备注:记  $a_{ij}$  为元素  $i$  比元素  $j$  的重要性程度。

### 1.3 建立最优传递矩阵

建立矩阵  $R$ ,使  $\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n (r_{ij} - a_{ij})^2$  最小,则称矩阵  $R$  为矩阵  $A$  的最优传递矩阵,且应满足: $r_{ij} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n (a_{ik} - a_{jk}) = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n (a_{ik} + a_{kj})$ 。

### 1.4 建立拟优传递矩阵

矩阵  $R$  为矩阵  $A$  的最优传递矩阵,则称矩阵  $D = e^R$  是矩阵  $A$  的一个拟优化传递矩阵,且满足: $d_{ij} = \exp(r_{ij})$ 。矩阵  $D$  为一致阵,自然满足一致性要求。通过拟优化传递矩阵  $D$ ,可直接求得各因素的权重分配集合  $W$ ,而无需进行一致性检验。

## 2 灰色关联分析数学模型

将灰色关联分析法引入到给水厂排泥水处理工艺优选中,通过分析判断待选方案与设定的理想方案的关联度的大小,来判断待选方案的优劣程度。

### 2.1 确定待选方案和理想方案

设初步设计的排泥水处理工艺待选方案为  $m$  个,每个方案包含  $n$  个评价指标,即:待选工艺方案为  $m$  个,每个方案包括  $n$  个指标: $X_i = \{X_i(k) | k = 1, 2, \dots, n\}^T (i = 1, 2, \dots, m)$ 。在对待选方案进行关联分析时,我们需要引入能够反映工艺流程优劣特征的理想方案,即: $X_0 = \{X_0(k) | k = 1, 2, \dots, n\}^T$ ,通过待选方案与理想方案的关联度分析来判断待选方案的性能。

### 2.2 初始数据无量纲化处理

由于系统中各评价指标的物理意义不同,导致数据的量纲也不一定相同,不便于比较,或在比较时难以得到正确的结论。因此在进行灰色关联度分析时,一般都要进行无量纲化的数据处理。

对于成本型指标,令:

$$s_{ij} = \frac{x_{0j}}{x_{ij}} (i = 1, 2, \dots, m, j = 1, 2, \dots, n);$$

对于效益型指标,令:

$$s_{ij} = \frac{x_{ij}}{x_{0j}} (i = 1, 2, \dots, m, j = 1, 2, \dots, n);$$

式中,  $x_{ij}$  为第  $i$  个待选方案的第  $j$  个指标的实际评价价值,  $x_{0j}$  为理想方案的第  $j$  个指标的评价价值。

### 2.3 灰色关联系数的确定

各待选方案与理想方案在各个评价指标的关联系数  $\xi_{0i}(k)$  可由下式计算:

$$\xi_{0i}(k) = \frac{\Delta_{\min} + \rho\Delta_{\max}}{\Delta_{0i}(k) + \rho\Delta_{\max}} \quad (1)$$

其中,  $\xi_{0i}(k)$  为第  $i$  个待选方案与立项方案关于第  $j$  个评价指标的关联系数。  $\Delta_{0i}(k)$  为关于第  $k$  个评价指标,理想方案与待选方案数列差的绝对值。  $\Delta_{0i}(k) = |X_0(k) - X_i(k)|$ 。  $X_0(k)$  为立项方案关于第  $k$  个评价指标的取值,  $X_i(k)$  为第  $i$  个待选方案关于评价指标  $k$  的取值。  $\rho$  为分辨系数,取 0.5。

### 2.4 构建灰色关联系数矩阵

由(1)式分别求得  $\xi_{ij}$  后可构成一个关联系数矩阵  $V = (v_1, v_2, \dots, v_i, \dots, v_n)$ , 其中  $v_i = (\xi_{i1}, \xi_{i2}, \dots, \xi_{ij}, \dots, \xi_{in})$  为第  $i$  个待选方案的各指标与理想方案对应指标的关联系数向量。

### 2.5 综合关联度的确定

待选方案与理想方案的关联度  $R$  可由下式计算:

$$R = \{R_1, R_2, \dots, R_m\} = V \cdot W \quad (2)$$

其中,  $W = \{w_1, w_2, \dots, w_m\}$ ,  $V = \{v_1, v_2, \dots, v_m\}^T = (\xi_{ij})_{n \times (m+1)}$ ,  $R_i$  为第  $i$  个待选方案的综合关联度,根据关联度最大原则,  $r_i$  值最大者所对应的方案为最优方案。这里“ $\cdot$ ”代表合成运算。

## 3 工程实例

重庆某电厂净水站,以渠江为水源,一期工程设计规模 2 万  $m^3/d$ ,供电厂生产及生活用水。净水站采取净水工艺如图 1 所示。



图 1 净水站工艺流程图

目前该净水站排泥废水处理系统由于种种原因无法正常运转,致使澄清池排泥水及滤池反冲洗废水得不到有效处理而直接排入附近水体。为了有效减轻对周边环境及水体的污染,针对现有工艺存在的问题,以“重庆某电厂水系统零排放项目”为依托,经过设计研究,提出符合出水水质要求的几种排泥废水处理工艺流程,并对其进行综合评价,从而确定符合该净水站的最优工艺。

### 3.1 确定比较数列

考虑到原水水质较好,浊度很低,因此所选方案应能较好的改善污泥的浓缩及脱水性能。在传统“合流制”和“分流制”的基础上,充分考虑不同形式预处理对出水和污泥处理效果的影响。跟据国内外实验研究经验,经过设计分析,初步拟定以下几种方案<sup>[8-11]</sup>,详见方案流程图 2-5。



图 2  $x_1$  方案流程图 1



图 3  $x_2$  方案流程图 2

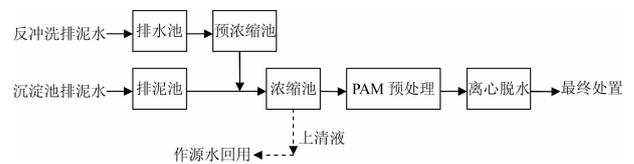


图 4  $x_3$  方案流程图 3

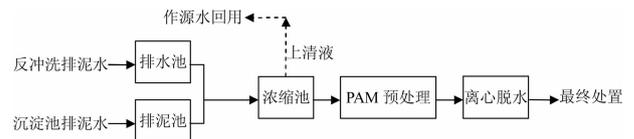


图 5  $x_4$  方案流程图 4

即,比较数列:  $X = (x_1, x_2, x_3, x_4)$

### 3.2 确定权重集合

#### 3.2.1 建立递阶层次分析结构模型

选择较优的排泥水处理方案,既要考虑排泥水处理效果又要兼顾社会效益、经济效益、环境效益。经过对目标多样性的逐级解析,确定具有 3 个层次的结构模型,如图 6 所示。

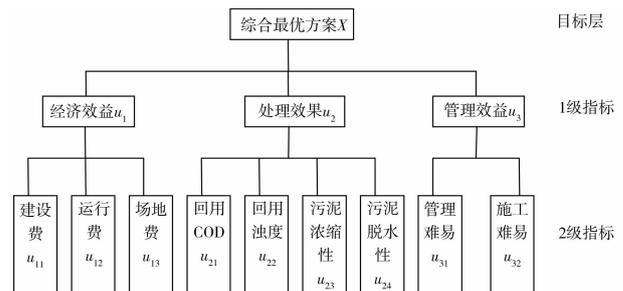


图 6 层次的结构模型

#### 3.2.2 构造判断矩阵

通过咨询相关专家意见<sup>[12-13]</sup>,运用成对比较法

和 3 标度比例法则,分别构造第 1 级指标、第 2 级指标对其相应上 1 层每一因素的成对比较阵,详见表 2-5。

表 2  $X - u_i$  成对比较阵

| $X - u_i$ | $u_1$ | $u_2$ | $u_3$ |
|-----------|-------|-------|-------|
| $u_1$     | 0     | -1    | 1     |
| $u_2$     | 1     | 0     | 1     |
| $u_3$     | -1    | -1    | 0     |

表 3  $u_1 - u_{1j}$  成对比较阵

| $u_1 - u_{1j}$ | $u_{11}$ | $u_{12}$ | $u_{13}$ |
|----------------|----------|----------|----------|
| $u_{11}$       | 0        | 1        | 1        |
| $u_{12}$       | -1       | 0        | 1        |
| $u_{13}$       | -1       | -1       | 0        |

表 4  $u_2 - u_{2j}$  成对比较阵

| $u_2 - u_{2j}$ | $u_{21}$ | $u_{22}$ | $u_{23}$ | $u_{24}$ |
|----------------|----------|----------|----------|----------|
| $u_{21}$       | 0        | 1        | 1        | 1        |
| $u_{22}$       | -1       | 0        | 0        | -1       |
| $u_{23}$       | -1       | 0        | 0        | -1       |
| $u_{24}$       | -1       | 1        | 1        | 0        |

表 5  $u_3 - u_{3j}$  成对比较阵

| $u_3 - u_{3j}$ | $u_{31}$ | $u_{32}$ |
|----------------|----------|----------|
| $u_{31}$       | 0        | 1        |
| $u_{32}$       | -1       | 0        |

3.2.3 确定权重分配集合

以判断矩阵  $X - u_i$  为例,建立判断矩阵  $X - u_i$  的最优传递矩阵:

$$R = \begin{bmatrix} 0 & -2/3 & 2/3 \\ 2/3 & 0 & 4/3 \\ -2/3 & -4/3 & 0 \end{bmatrix}$$

再建立矩阵  $R$  的拟优化传递矩阵  $D$ :

$$D = \begin{bmatrix} 1 & 0.513 & 1.947 \\ 1.947 & 1 & 3.79 \\ 0.513 & 0.264 & 1 \end{bmatrix}$$

利用 MATLAB 仿真程序计算拟优化传递矩阵  $D$  的特征向量  $w_i$ ,即权重分配向量:

$$W = (0.289 \quad 0.563 \quad 0.148)^T$$

同理,依次计算各判断矩阵的权重并进行层次总排序,结果见表 6。

表 6 层次总排序

| 准则层      | $u_1$ | $u_2$ | $u_3$ | 层次总排序 |
|----------|-------|-------|-------|-------|
|          | 0.289 | 0.563 | 0.148 |       |
| $u_{11}$ | 0.563 |       |       | 0.163 |
| $u_{12}$ | 0.289 |       |       | 0.084 |
| $u_{13}$ | 0.148 |       |       | 0.042 |
| $u_{21}$ |       | 0.457 |       | 0.257 |
| $u_{22}$ |       | 0.132 |       | 0.074 |
| $u_{23}$ |       | 0.132 |       | 0.074 |
| $u_{24}$ |       | 0.279 |       | 0.157 |
| $u_{31}$ |       |       | 0.731 | 0.108 |
| $u_{32}$ |       |       | 0.269 | 0.039 |

3.3 构建灰色关联矩阵

以国内外给水厂排泥水处理工艺的试验研究及成功运行经验为基础,并结合专家的意见<sup>[14-15]</sup>。采用模糊数学 5 级划分法,构造待选方案与理想方案灰色关联排序矩阵,见表 7。

表 7 灰色关联排序矩阵

| 方案-指标    | $x_0$ | $x_1$ | $x_2$ | $x_3$ | $x_4$ |
|----------|-------|-------|-------|-------|-------|
| $u_{11}$ | 0.9   | 0.9   | 0.7   | 0.3   | 0.5   |
| $u_{12}$ | 0.9   | 0.9   | 0.7   | 0.3   | 0.5   |
| $u_{13}$ | 0.9   | 0.9   | 0.7   | 0.3   | 0.5   |
| $u_{21}$ | 0.9   | 0.5   | 0.5   | 0.9   | 0.7   |
| $u_{22}$ | 0.9   | 0.5   | 0.5   | 0.9   | 0.7   |
| $u_{23}$ | 0.9   | 0.5   | 0.3   | 0.9   | 0.7   |
| $u_{24}$ | 0.9   | 0.5   | 0.3   | 0.9   | 0.7   |
| $u_{31}$ | 0.9   | 0.9   | 0.7   | 0.5   | 0.7   |
| $u_{32}$ | 0.7   | 0.7   | 0.7   | 0.7   | 0.7   |

对关联排序矩阵进行无量纲化处理,并根据式(1)得到灰色关联系数矩阵:

$$V = \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \\ v_3 \\ v_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 0.603 & 0.603 & 0.603 \\ 0.33 & 0.33 & 0.33 \\ 0.426 & 0.426 & 0.426 \\ 0.426 & 0.426 & 0.426 & 1 & 1 \\ 0.426 & 0.426 & 0.603 & 0.603 & 0.603 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 0.603 & 1 \\ 0.33 & 0.33 & 0.33 & 0.33 & 0.33 & 1 \end{bmatrix}$$

3.4 综合关联度的确定

通过对待选方案进行社会、经济、环境等因素的综合分析,由式(2)确定综合关联度:

$$R = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 0.426 & 0.426 \\ 0.603 & 0.603 & 0.603 & 0.426 & 0.426 \\ 0.33 & 0.33 & 0.33 & 1 & 1 \\ 0.426 & 0.426 & 0.426 & 0.33 & 0.33 \\ 0.426 & 0.426 & 1 & 1 & \\ 0.603 & 0.603 & 0.603 & 1 & \\ 1 & 1 & 0.603 & 1 & \\ 0.33 & 0.33 & 0.33 & 1 & \end{bmatrix} \circ \begin{bmatrix} 0.163 \\ 0.084 \\ 0.042 \\ 0.259 \\ 0.123 \\ 0.123 \\ 0.058 \\ 0.108 \\ 0.039 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.67 & 0.54 & 0.76 & 0.38 \end{bmatrix}$$

结果表明,按照关联度最大原则待选方案  $x_3$  综合评价为最优方案。由此,该水厂应采用工艺流程  $x_3$ ,如图 7 所示。

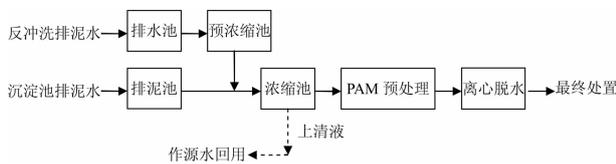


图 7 最优方案

### 4 结论

1)应用模糊数学灰色关联分析理论和改进层次分析法,将对象视作系统,按照分解、比较、判断、综合的思维方式对系统进行系统分析,建立了给水厂排泥水处理工艺优选模型。该模型计算简便、结果明确,便于决策者直接了解和掌握。

2)该文采用改进层次分析法确定评价因素的权重值,所需判断信息简单、直观、易为专家和决策者接受与掌握,所得的判断矩阵自然满足一致性要求,不需要进行一致性检验。

3)模型中整个运算过程,均可以利用 MATLAB 仿真程序得以实现。使得计算过程更加快捷,计算结果更加精确。

4)模型与现行的方案评价体系相比,克服了其存在的个别性、局限性等弊端,使选定的工艺流程较好的兼顾社会、经济、环境等诸因素的影响,为工程实践提供了全面的技术分析和定量的理论支持。

### 参考文献:

[ 1 ] 向平,蒋绍阶. 给水厂排泥水处理回用的若干问题[J]. 重庆建筑大学学报,2004,26(4):70-72.

XIANG PING,JIANG SHAO-JIE. Some Issues about the Recycling Liquid Sludge Water from Water Treatment Plant [J]. Journal of Chongqing Jianzhu University, 2004,26(4):70-72.

[ 2 ] SAATY T L. There is no mathematical validity for using fuzzy number crunching in the analytic hierarchy process[J]. Journal of Systems Science and Systems Engineering, 2006,15(4):457-464.

[ 3 ] SAATY T L. Multi-criteria decision making[M]. RWS Publications, Pittsburgh,PA,1990.

[ 4 ] 张卫中. 改进的 AHP 及其在地灾易发程度分区中的实践[J]. 土木建筑与环境工程,2009,31(2):85-89.

ZHANG WEI-ZHONG. Improved AHP Assessment Model and Its Practice in Geological Hazard Susceptibility Zoning[J]. Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering,2009,31(2):85-89.

[ 5 ] 白俊文,侍克斌. 用改进的层次分析法(AHP)进行坝基防渗方案的优选[J]. 水利与建筑工程学报,2004,2(4):11-14.

BAI JUN-WEN, SHI KE-BIN. Improved Hierarchy Analysis Process Used In Optimal Selection of Seepage Control Project of Dam Foundation [J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering,2004,2(4):11-14.

[ 6 ] LU S H. Grey relational analysis coupled with principal component analysis for optimization design of the cutting parameters in high-speed end milling[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2009, 209 ( 8 ): 3808-3817.

[ 7 ] YANG F. Integrated Geographic Information Systems-Based Suitability Evaluation of Urban Land Expansion: A Combination of Analytic Hierarchy Process and Grey Relational Analysis [J]. Environmental Engineering Science,2009,26(6):1025-1032.

[ 8 ] 王正林. 无锡市梅园水厂排泥水处理工程[J]. 中国给水排水,2005,21(3):70-73.

WANG ZHENG-LIN. Sludge Water Treatment Project of Meiyuan Water Plant in Wuxi City [J]. CHINA WATER & WASTE WATER,2005,21(3):70-73.

[ 9 ] 陈士才,张磊. 杭州市祥符水厂的排泥水处理工程[J]. 中国给水排水,2004,20(11):77-79.

CHEN SHI-CAI,ZHANG LEI. Sludge water treatment project of meiyuan water plant in wuxi city[J]. Ching Water & Waste Water,2004,20(11):77-79.

[10] Miyanoshta T. Economic evaluation of combined treatment for sludge from drinking water and sewage treatment plants in Japan[J]. Journal of Water Supply and Technology -AQUA,2009,58(3):221-227.

(下转第 144 页)

- [J]. 非金属矿, 2006, 29(5): 53-58.
- WANG PING, LI GUO-CHANG. Preparation of biological aerated ceramsite filter medium and its performance[J]. Non-Metallic Mines, 2006, 29(5): 53-58.
- [9] 李善评, 张启磊, 付敬, 等. 高炉瓦斯灰曝气生物滤池填料的制备及其性能研究[J]. 山东大学学报: 理学版, 2007, 42(11): 1-5.
- LI SHAN-PING, ZHANG QI-LEI, FU JING, et al. Preparation and performance study of filter media made by blast furnace dust for a biological aerated filter[J]. Journal of Shandong University: Natural Science, 2007, 42(11): 1-5.
- [10] FRANCISCO OSORIO, ERNESTO HONTORIA. Wastewater treatment with a double-layer submerged biological aerated filter, using waste materials as biofilm support [J]. Journal of Environmental Management, 2002, 65(1): 79-84.
- [11] 葛伟青, 王益民, 刘艳娟, 等. 海绵铁和陶粒填料曝气生物滤池处理豆制品废水[J]. 工业水处理, 2008, 28(5): 57-59.
- GE WEI-QING, WANG YI-MIN, LIU YAN-JUAN, et al. Study on the biological aerated filter used for treating bean wastewater with spongy iron and argil granules[J]. Industrial Water Treatment, 2008, 28(5): 57-59.
- [12] YING-JIE SHEN, GUANG-XIA WU, YAO-BO FAN, et al. Performances of biological aerated filter employing hollow fiber membrane segments of surface-improved poly (sulfone) as biofilm carriers[J]. Journal of Environmental Sciences, 2007, 19(7): 811-817.
- [13] YAQIN ZHAO, QINYAN YUE, RENBO LI, et al. Research on sludge-fly ash ceramic particles (SFPC) for synthetic and municipal wastewater treatment in biological aerated filter (BAF) [J]. Bioresource Technology, 2009, 100(21): 4955-4962.
- [14] WON- SEOK CHANG, HUNG-THUAN TRAN, DOO-HYUN PARK, et al. Ammonium nitrogen removal characteristics of zeolite media in a Biological Aerated Filter (BAF) for the treatment of textile wastewater[J]. Journal of Industrial and Engineering Chemistry, 2009, 15(4): 524-528.
- [15] 李小琴, 汪永辉, 周建冬. 沸石滤料曝气生物滤池的挂膜启动研究[J]. 环境科学与管理, 2008, 33(9): 91-93.
- LI XIAO-QIN, WANG YONG-HUI, ZHOU JIAN-DONG. The research of the film formation and start-up of zeolite biological aerated filter [J]. Environmental Science and Management, 2008, 33(9): 91-93.
- [16] 曾正中, 王厚成, 李勃, 等. 曝气生物滤池两种填料挂膜的对比试验[J]. 环境工程, 2008, 26(1): 21-23.
- ZENG ZHENG-ZHONG, WANG HOU-CHENG, LI BO, et al. Comparative test on the start-up of two kinds packing materials in biological aerated filter [J]. Environmental Engineering, 2008, 26(1): 21-23.

(编辑 王秀玲)

(上接第 137 页)

- [11] SMITH K M. Sewage sludge-based adsorbents: A review of their production, properties and use in water treatment applications [J]. Water Research, 2009, 43(10): 2569-2594.
- [12] XU G R. Recycle of Alum recovered from water treatment sludge in chemically enhanced primary treatment [J]. Journal of Hazardous Materials, 2009, 116(2/3): 663-669.
- [13] 闫嘉钰. 基于灰色综合关联度的数控机床热误差测点优化新方法及应用[J]. 四川大学学报: 工程科学版, 2008, 40(2): 160-164.
- YAN JIA-YU. Application of a New Optimizing Method for the Measuring Points of CNC Machine Thermal Error Based on Grey Synthetic Degree of Association [J]. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition), 2008, 40(2): 160-164.
- [14] TONY M A. Conditioning of aluminium-based water treatment sludge with Fenton's reagent: Effectiveness and optimising study to improve dewaterability [J]. CHEMOSPHERE, 2008, 72(4): 673-677.
- [15] 穆瑞, 张家泰. 基于灰色关联分析的层次综合评价[J]. 系统工程理论与实践, 2008, 10: 125-130.
- MU RUI, ZHANG JIA-TAI. Research of hierarchy synthetic evaluation based on grey relational analysis [J]. Systems Engineering - Theory & Practice, 2008, 10: 125-130.

(编辑 胡玲)