

文章编号:1673-0062(2011)02-0063-04

# 灰色关联分析在硫酸盐还原菌还原 U(VI) 试验设计中的应用

荣丽杉<sup>1</sup>, 谢水波<sup>1,2</sup>, 凌 辉<sup>1</sup>, 王水云<sup>3</sup>

(1. 南华大学 污染控制与资源化技术湖南省重点实验室, 湖南 衡阳 421001; 2. 南华大学 铀矿冶生物技术国防重点学科实验室, 湖南 衡阳 421001; 3. 长沙有色冶金设计研究院, 湖南 长沙 410011)

**摘 要:**基于硫酸盐还原菌(SRB)还原 U(VI) 试验设计方案, 通过灰色关联分析方法, 确定在硫酸盐还原菌(SRB)还原 U(VI) 试验中主要的影响因素。结果表明, 该方法计算简便, 结果客观可靠, 为含 U(VI) 废水处理试验设计提供了科学依据。

**关键词:**铀; 硫酸盐还原菌(SRB); 试验; 灰色关联分析

**中图分类号:**X703.1      **文献标识码:**B

## Application of Gray Relational Analysis to the Experimental Design on Reduction of U(VI) by Sulfate-reducing Bacteria

RONG Li-shan<sup>1</sup>, XIE Shui-bo<sup>1,2</sup>, LING Hui<sup>1</sup>, WANG Shui-yun<sup>3</sup>

(1. Hunan Provincial Key Laboratory of Pollution Control and Resources Technology, University of South China, Hengyang, Hunan 421001, China; 2. Key Discipline Laboratory for National Defense for Biotechnology in Uranium Mining and Hydrometallurgy, University of South China, Hengyang, Hunan 421001, China; 3. Changsha Engineering and Research Institute of Nonferrous Metallurgy, Changsha, Hunan 410011, China)

**Abstract:** This paper determines the main factors in the experiment of U(VI) Reduction by sulfate-reducing bacteria (SRB) through gray correlation analysis, based on the experimental design. Results show that the method is simple, objective, reliable, and provides a scientific basis for experimental design to treat the wastewater containing U(VI).

**key words:** uranium; sulfate-reduction bacteria (SRB); experiment; gray relational analysis

## 0 引 言

含铀放射性废水的处理一直是国内外学者研究的热点问题, 开发高效低耗的含铀废水治理技术是

核工业可持续发展特别是关乎民生的重大课题。

硫酸盐还原菌(SRB)是一种能还原沉淀 U(VI)、阻止放射性铀迁移和扩散的普遍存在的微生物, 影响 SRB 还原沉淀 U(VI) 的因素很多<sup>[1-2]</sup>。

收稿日期: 2011-03-02

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(10775065); 湖南省高校创新平台基金资助项目(09K076); 湖南省重点学科基金资助项目(湘教通[2006]180号)

作者简介: 荣丽杉(1984-), 女, 江西萍乡人, 南华大学城市建设学院助教。主要研究方向: 水处理理论与技术。

因此,通过试验分析确定硫酸盐还原菌(SRB)还原 U(VI)试验中最主要的影响因素,探讨 SRB 的最佳还原条件意义重大.

随着灰色系统理论的出现和发展,灰色关联分析逐渐成为一种广泛应用的评价方法.灰色关联分析可以在不完全的信息中,对所要分析研究的各因素,通过一定的数据处理,在随机的因素序列间,找到它们的关联性,发现主要问题,找到主要特征和主要影响因素.本文利用灰色关联分析方法,探讨了硫酸盐还原菌(SRB)还原 U(VI)试验中最主要的影响因素,为含 U(VI)放射性废水处理试验提供了科学依据.

1 灰色关联分析原理

灰关联评价方法是灰色系统理论中新的分析方法,是采用量化方法所获得的灰关联度来区分系统之间关系密切程度(或影响大小)的主体后,进行定量与定性分析相结合的一种方法.它通过对系统统计序列几何关系的比较来区分系统中多因素间的关联程度,序列曲线的几何形状越接近,则它们之间的关联度越大<sup>[3-5]</sup>.

1.1 确定参考序列和比较序列

设  $m$  个比较对象  $X_1, X_2, \dots, X_m$ , 每个比较序列所对应影响因素的测定数目为  $m$ , 则比较序列记为:

$$\begin{aligned} X_1^{(0)}(k) &= \{x_1^{(0)}(1), x_1^{(0)}(2), \dots, x_1^{(0)}(n)\} \\ X_2^{(0)}(k) &= \{x_2^{(0)}(1), x_2^{(0)}(2), \dots, x_2^{(0)}(n)\} \\ &\dots\dots\dots \\ X_m^{(0)}(k) &= \{x_m^{(0)}(1), x_m^{(0)}(2), \dots, x_m^{(0)}(n)\} \end{aligned}$$

表 1 pH 值对 SRB 去除铀的影响(铀浓度为 25 mg/L,菌种量为 10 mL(0.101 g/L),35℃)

Table 1 The effect of pH on the removal of U(VI) by SRB (conditions:[U(VI)]=25 mg/L,m(SRB)=10 mL(0.101 g/L,35℃)

| pH                        | 3.0   | 5.0   | 6.0  | 7.0  | 8.0  |
|---------------------------|-------|-------|------|------|------|
| 剩余量/(mg·L <sup>-1</sup> ) | 22.58 | 14.23 | 5.35 | 4.28 | 5.78 |
| 铀的去除率/%                   | 9.7   | 43.1  | 78.6 | 82.9 | 76.9 |

表 2 菌体浓度对铀的去除的影响(铀的浓度为 25 mg/L,pH 为 7.0,温度为 35℃)

Table2 The effect of cell concentration on the removal of U(VI) by SRB ([U(VI)]=25 mg/L,pH 7.0,35℃)

| 菌样量/mL                      | 1     | 2     | 3     | 5     | 7     |
|-----------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 菌浓度/(g·L <sup>-1</sup> )    | 0.058 | 0.101 | 0.127 | 0.258 | 0.387 |
| 剩余铀浓度/(mg·L <sup>-1</sup> ) | 5.03  | 2.25  | 1.82  | 0.96  | 0.86  |
| 去除率/%                       | 79.9  | 83.5  | 91.0  | 96.2  | 96.6  |

为了对比较序列进行评价,需要确定评价参考因素  $X_0$ ,参考序列:

$$X_0^{(0)}(k) = \{x_0^{(0)}(1), x_0^{(0)}(2), \dots, x_0^{(0)}(n)\}$$

1.2 计算关联系数

$$\xi_{0,i}(k) = \frac{\min_k \min_i |x_0(k) - x_i(k)| + \rho \max_k \max_i |x_0(k) - x_i(k)|}{|x_0(k) - x_i(k)| + \rho \max_k \max_i |x_0(k) - x_i(k)|}$$

(1)

式中,  $\xi_{0,i}(k)$ —第  $I$  类指标样本点  $k$  的关联系数;  
 $\rho$ —分辨系数,且  $\in (0,1)$  取  $\rho = 0.5$ ;

$|x_0(k) - x_i(k)|$ —第  $m$  个指标的参考序列数据与对应指标的第  $i$  个数据的差值绝对值;

$\min_k \min_i |x_0(k) - x_i(k)|$ —二级最小差;

$\max_k \max_i |x_0(k) - x_i(k)|$ —二级最大差.

1.3 计算关联度  $r_{0,i}$

综合各点的关联系数,求出关联度  $r_{0,i}$ ,计算公式为:

$$r_{0,i} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \xi_{0,i}(k)$$

(2)

2 实例应用

2.1 单影响因素试验结果

许多研究表明,微生物对重金属离子的去除取决于微生物自身的特性外,还受环境因素的影响.在用硫酸盐还原菌(SRB)还原 U(VI)试验中,pH 是影响 SRB 代谢活性的主要因素之一,温度是影响厌氧硫酸盐还原的另一主要因素,决定 SRB 的代谢活性和生长速度.此外,菌体浓度和初始铀浓度对试验也都有影响.部分试验结果见表 1~表 4.

表 3 初始铀浓度对 SRB 去除铀的影响( 菌体浓度为 0. 105 g/L,pH 为 7. 0,温度为 35℃)

Table 3 The effect of initial uranium concentration on the removal of U( VI) by SRB  
( condition[ SRB] =0. 105 g/L,pH 7. 0,35℃)

|                              |        |        |        |        |       |
|------------------------------|--------|--------|--------|--------|-------|
| 铀浓度/( mg · L <sup>-1</sup> ) | 15     | 25     | 45     | 85     | 100   |
| 还原量/( mg · L <sup>-1</sup> ) | 13. 72 | 22. 75 | 27. 77 | 30. 32 | 3. 38 |
| 去除率/%                        | 91. 5  | 91. 0  | 61. 7  | 75. 7  | 3. 4  |

表 4 温度对菌体还原铀的影响( 菌体浓度为 0. 127 g/L,pH 为 7. 0)

Table 4 The effect of temperature on the removal of U( VI) by SRB( [SRB] =0. 127 g/L,pH =7. 0)

|                              |        |        |       |        |        |
|------------------------------|--------|--------|-------|--------|--------|
| <i>t</i> /℃                  | 20     | 30     | 35    | 40     | 50     |
| 剩余量/( mg · L <sup>-1</sup> ) | 22. 85 | 17. 38 | 4. 60 | 15. 85 | 22. 95 |
| 铀的去除率/%                      | 8. 6   | 30. 5  | 81. 6 | 36. 6  | 8. 2   |

pH、温度、菌体浓度和初始铀浓度对铀的去除率影响是有差异的,传统的各类因素的影响程度一般通过专家打分、层次分析法得到各类指标的权重,虽然操作简便,但是主观影响因素太大,难免判断错误. 因此,本研究通过试验结果,尽量避免主观影响,通过计算各类影响因素与铀去除率的关联程度,计算各类影响因素对铀去除率的影响系数.

2.2 影响因素判别标准与数量化

影响试验结果的主要因素是评判试验铀去除率效果的主要变量. 就其可度量性来看,本试验中主要为定量变量. 定量因素量级划分方法是在设定区间内,视区间内各值为各一级,虽然定量数值

不同,但属于同一性质,取同一指标值. 如在 pH 为 7. 0 的中性条件生长 6 d 后血清瓶中 U( VI) 几乎全部被去除;pH =6. 0 ~ 7. 0 时,铀的去除率就降低;当 pH >7. 0 时,溶液中的 OH<sup>-</sup> 离子浓度升高,部分 U( VI) 会转化成不稳定的 UO<sub>2</sub> (OH)<sub>2</sub> 沉淀下来,干扰了生物还原过程,降低了铀的去除率;pH >8. 0 或 pH <5. 0 时,铀的去除率更低. 对于这四个区间,根据其对应硫酸盐还原菌( SRB) 还原 U( VI) 试验的正影响程度,各取一值,用 4 分、3 分、2 分、1 分数量表示,这样定量因素可以转换为某一区间值. 本试验中的四个主要影响因素根据数量化原理,确定了各类影响因素的具体判别标准( 表 5).

表 5 硫酸盐还原菌( SRB) 还原 U( VI) 试验影响因素判别标准

Table 5 The actors criterion test on the experimental of U( VI) Reduction by sulfate-reducing bacteria ( SRB)

| 判别因子                                      | 量级标准                   | 影响级别 | 判别因子                                                     | 量级标准                            | 影响级别 |
|-------------------------------------------|------------------------|------|----------------------------------------------------------|---------------------------------|------|
| pH                                        | 7. 0                   | 4    | 温度 <i>T</i> /℃                                           | 33 < <i>T</i> < 37              | 4    |
|                                           | 6. 5 < pH < 7. 0       | 3    |                                                          | 37 < <i>T</i> < 41              | 3    |
|                                           | 4. 5 < pH < 6. 5       | 2    |                                                          | 20 < <i>T</i> < 33              | 2    |
|                                           | pH < 4. 5 或 pH > 8. 0  | 1    |                                                          | <i>T</i> < 20 或 <i>T</i> > 41   | 1    |
| 菌体浓度 <i>C</i><br>/( g · L <sup>-1</sup> ) | > 0. 3                 | 4    | 初始铀浓度<br><i>C</i> <sub>0</sub> /( mg · L <sup>-1</sup> ) | <i>C</i> <sub>0</sub> < 20      | 4    |
|                                           | 0. 2 < <i>C</i> < 0. 3 | 3    |                                                          | 20 < <i>C</i> <sub>0</sub> < 40 | 3    |
|                                           | 0. 1 < <i>C</i> < 0. 2 | 2    |                                                          | 40 < <i>C</i> <sub>0</sub> < 70 | 2    |
|                                           | <i>C</i> < 0. 1        | 1    |                                                          | <i>C</i> <sub>0</sub> > 70      | 1    |

2.3 各影响因素的影响系数

各影响因素的影响系数是其影响硫酸盐还原菌( SRB) 还原 U( VI) 试验程度的量度. 本研究采用上述试验结果,把硫酸盐还原菌( SRB) 还原 U( VI) 试验中铀的去除率划分为 4 级:去除效果好

( 铀的去除率达到 90% 以上)、去除效果较好( 铀的去除率达到 80% ~ 90% )、去除效果一般( 铀的去除率达到 50% ~ 80% )、去除效果较差( 铀的去除率低于 50% ),根据数量化原理确定其等级值为 4、3、2、1.

( 下转第 78 页)

根据灰色关联分析,分别计算 pH、温度、菌体浓度和初始铀浓度与铀的去除率.首先利用公式(1)计算关联系数,综合各关联系,利用公式(2)求出关联度,最后得出 4 个影响因素与铀去除率的关联度分别为: pH 0.689, 温度 0.626, 菌体浓度 0.720, 初始铀浓度 0.681.采用归一化方法,通过上述计算出的关联度计算各个影响因素对 U(VI)去除率的影响系数,得出 pH、温度、菌体浓度和初始铀浓度分别为:0.254,0.230,0.265 和 0.250.

因此,对 U(VI)去除率影响程度由大到小的影响因素是菌体浓度、pH、初始铀浓度和温度.

### 3 结论与讨论

综上所述,菌体浓度是影响硫酸盐还原菌(SRB)还原 U(VI)试验的最主要因素,这是显而易见的,铀的去除率随菌体浓度的增加而增加,但是通过实验证明,菌体浓度达到一定的值后,铀的去除率会趋于稳定.其次是 pH 值,试验结果表明,SRB 还原铀的能力在接近中性的环境中最强,但随着初始 pH 值由中性向酸性靠近,铀的生物还原效果逐渐变差,在

强酸性环境下几乎没有还原能力<sup>[6]</sup>.

硫酸盐还原菌(SRB)还原 U(VI)是一种有效处理含 U(VI)放射性废水的方法.通过确定影响硫酸盐还原菌(SRB)还原 U(VI)试验的主要因素,探讨 SRB 的最佳还原条件,可为处理含 U(VI)放射性废水提供科学的依据.

### 参考文献:

- [1] 赵宇华,叶央芳,刘学东.硫酸盐还原菌及其影响因子[J].环境污染与防治,1997,19(5):41-43.
- [2] Jennfer L Nyman,Hsin I Wu,Margaret E. Inhibition of a U(VI) and sulfate-reducing consortia by U(VI)[J]. Environ. Sci. Technol,2007,41(18):6528-6533.
- [3] 邓聚龙.灰色系统理论教程[M].武汉:华中理工出版社,1990.
- [4] 罗党,刘思峰.灰色关联决策方法研究[J].中国管理科学,2005,13(1):101-106.
- [5] 党耀国,刘世峰,刘斌,等.基于动态多指标灰色关联决策模型研究[J].中国工程科学,2005,7(2):69-72.
- [6] 冯颖,康勇,张忠国.含重金属离子酸性废水的厌氧生物处理[J].环境科学与技术,2004,27(6):104-106.