

# 建筑承包商绿色施工能力评价方法研究

仇国芳, 李 悦

(西安建筑科技大学管理学院, 陕西 西安 710055)

**摘要:** 绿色施工作为建筑全寿命周期中的一个重要阶段, 是实现建筑领域资源节约和节能减排的关键环节。承包商作为施工活动的主体, 决定着绿色施工方案的可行性及实施效果。从施工方案绿色度和承包商综合能力两方面出发, 构建了多层次评价指标体系; 利用粗糙集对指标进行了约简, 并确定了指标权重; 结合可拓理论构建了承包商绿色施工能力的评价模型。旨在为评价承包商的绿色施工能力提供一套评价方法, 从而为企业选择绿色承包商提供依据。

**关键词:** 承包商; 绿色施工; 粗糙集; 可拓理论; 评价方法

**中图分类号:** F414

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1006-7930(2015)04-0612-5

## Research on evaluation method of building contractor green construction capacity

QIU Guofang, LI Yue

(School of Management, Xi'an Univ. of Arch. & Tech., Xi'an 710055, China)

**Abstract:** Green construction, as an important phase of the whole life cycle of the building, is the key sector for achieving energy saving in construction. Contractor, the main body in construction activities, determines the feasibility and implementation of green construction plan and its effect. Considering both the construction program green performance and the contractors comprehensive capacity, a multi-level evaluation system is built; and a rough set theory to reduce index and calculate the weight is used. A green construction contractor capacity evaluation model is established by extension theory. It aims to provide a set of evaluation methods for the evaluation of the contractor's ability to undertaken green construction, and provide basis for enterprises to choose green contractors.

**Key words:** contractor; green construction; rough set; extension theory; evaluation method

施工阶段是建筑全寿命周期资源消耗的关键环节, 这一阶段实行绿色施工, 对建筑物的资源节约和节能减排起着重要作用。近年来, 国内外学者从不同角度对绿色施工进行了研究, 主要针对施工方案中的技术绿色度问题开展了大量的评价研究, 较少考虑承包商的综合能力。而承包商作为施工活动的主体, 其综合能力直接影响着绿色施工方案的可行性和实施效果。因此, 对绿色施工的评价, 应考虑施工方案绿色度和承包商综合能力两方面因素, 从而得出综合的承包商绿色施工能力评价。

### 1 承包商绿色施工能力评价指标体系构建

按照《建筑工程绿色施工评价标准》的要求, 绿色施工应当在保证质量、安全等基本要求的前提下, 通过科学管理和技术进步, 最大限度地节约资源, 减少对环境负面影响, 实现“四节一环保”<sup>[1]</sup>。由

于承包商是施工活动科学管理和技术进步的主体, 其自身素质影响了施工方案的有效性及合理性, 因此, 评价指标应当既包含对承包商自身条件的考察, 又包含对施工方案“四节一环保”水平的评估。在参考了绿色施工评价指标<sup>[2-3]</sup>, 传统承包商评价指标<sup>[4]</sup>等评价指标体系, 以及《绿色施工导则》<sup>[5]</sup>, 《建筑工程绿色施工评价标准》等相关规范文件的基础上, 将其中大量指标提取出来设计成调查问卷, 走访部分绿色施工示范性项目进行调研。根据多位相关从业者的问卷反馈结果, 提取其中重要程度较高的指标, 构建了如表 1 所示的多层次评价指标体系。

表 1 承包商绿色施工能力评价指标体系

Tab. 1 Green construction contractor evaluation index system

一级指标	二级指标
施工方案绿色度 ( $A_1$ )	三废排放与处理( $a_1$ )
	土壤与地下水保护( $a_2$ )
	噪声处理( $a_3$ )
	光污染处理( $a_4$ )

收稿日期: 2015-02-10

修改稿日期: 2015-08-03

基金项目: 陕西省重点学科建设专项资金资助项目 (E08001); 陕西省高校哲学社会科学重点研究基地项目 (11JZ027); 教育部人文社科项目 (12YJA630019)

作者简介: 仇国芳 (1967-), 女, 博士, 教授, 主要从事粗糙集、智能决策方面研究。E-mail: qiugf\_home@163.com

续表 1

施工方案绿色度 ( $A_1$ )	节水措施( $a_5$ )
	节地措施( $a_6$ )
	节材措施( $a_7$ )
	节能措施( $a_8$ )
承包商综合能力 ( $A_2$ )	绿色施工设备( $a_9$ )
	绿色施工技术( $a_{10}$ )
	人员结构及绿色施工培训( $a_{11}$ )
	绿色项目承包经验( $a_{12}$ )
	企业绿色战略规划( $a_{13}$ )
	绿色技术投资力度( $a_{14}$ )
	施工现场安全管理( $a_{15}$ )

## 2 理论及评价模型

### 2.1 粗糙集理论与模型<sup>[6-8]</sup>

#### 2.1.1 粗糙集理论

粗糙集理论(rough set theory, RST)是一种处理不精确、不一致与不完全数据的数学工具,可用于计算指标权重。

粗糙集的研究对象通常表示为信息系统  $S=(U, A, V, f)$ , 其中,  $U=\{U_1, U_2, \dots, U_{|U|}\}$  为对象集合;  $A=\{a_1, a_2, \dots, a_{|A|}\}$  为属性集合;  $V=\bigcup V_a$ , 其中  $a \in A, V_a$  为属性  $a$  的值域;  $f:U \times A \rightarrow V$  为信息函数。

#### 2.1.2 粗糙集模型

粗糙集中的核心概念为:等价关系:

$$R = \{(x, y) \in U \times U : f(x, q) = f(y, q), \forall q \in P\}$$

等价类:

$$U/R = \{[x_i]_R | x_i \in U\}$$

其中:  $[x_i]_R = \{x_j | (x_i, x_j) \in R\}$ . 下近似:

$$\underline{R}(X) = \{x_i | [x_i]_R \subseteq X\}$$

也称作  $X$  的正域, 记作  $pos_R(X)$ .

若  $P$  和  $Q$  是  $U$  上的等价关系,  $Q$  的  $P$  正域记作  $pos_P(Q)$ , 则  $Q$  与  $P$  之间的依赖度定义为:

$$\gamma(P, Q) = |pos_P(Q)|/|U|, 0 \leq \gamma(P, Q) \leq 1 \quad (1)$$

其中:  $|\cdot|$  表示集合的基数. 属性重要性定义为:

$$sig(p, Q) = \gamma(P, Q) - \gamma(P - \{p\}, Q) \quad (2)$$

在信息系统中, 属性  $a_i (a_i \in A)$  在  $A$  中的重要性为:

$$\begin{aligned} sig(a_i, A) &= \gamma(A, A) - \gamma(A - \{a_i\}, A) \\ &= 1 - \gamma(A - \{a_i\}, A) \end{aligned} \quad (3)$$

于是得出属性  $a_i (a_i \in A)$  在  $A$  中的权重为:

$$\omega(a_i) = sig(a_i) / \sum_{i=1}^m sig(a_i) \quad (4)$$

### 2.2 可拓理论与模型

#### 2.2.1 可拓理论

可拓学是以蔡文教授为首的我国学者们创立的新学科, 其中, 基元理论提出了描述事、物和关系的基本元——“物元”、“事元”和“关系元”, 讨论了基元的可拓性和可拓变换规律, 研究了定性 with 定量相结合的可拓模型, 可用于多指标评价。

#### 2.2.2 可拓模型<sup>[9-10]</sup>

##### (1) 确定经典域和节域

假设将评价体系划分为  $j$  个评价等级, 评价体系中有  $i$  个评价指标. 则评价体系的经典域物元为:

$$R_j = (N_j, c_i, x_{ji}) = \begin{bmatrix} N_j & c_1 & \langle a_{j1}, b_{j1} \rangle \\ & c_2 & \langle a_{j2}, b_{j2} \rangle \\ & \vdots & \vdots \\ & c_n & \langle a_{jn}, b_{jn} \rangle \end{bmatrix}$$

评价体系的节域物元表示为:

$$R_p = (N_p, c_i, x_{pi}) = \begin{bmatrix} N_p & c_1 & \langle a_{p1}, b_{p1} \rangle \\ & c_2 & \langle a_{p2}, b_{p2} \rangle \\ & \vdots & \vdots \\ & c_n & \langle a_{pn}, b_{pn} \rangle \end{bmatrix}$$

##### (2) 确定待评价物元

根据评价指标的各项得分数据, 待评价物元通过如下方式表示:

$$R = (N, c_i, x_i) = \begin{bmatrix} N & c_1 & x_1 \\ & c_2 & x_2 \\ & \vdots & \vdots \\ & c_n & x_n \end{bmatrix}$$

式中:  $N$  表示待评价物元;  $c_i$  为第  $i (i=1, 2, \dots, n)$  个评价指标;  $x_i$  为待评价物元关于评价指标的得分。

##### (3) 计算关联函数

引入距概念, 即实数轴上的点  $x_0$  关于区间  $X_0 = (a, b)$  的距表示为:

$$\rho(x_0, X_0) = |x_0 - (a+b)/2| - (b-a)/2 \quad (5)$$

计算关联函数:

$$k_j(x_i) = \begin{cases} -\rho(x_i, x_{ji})/|x_{ji}|, & x_i \in x_{ji} \\ \rho(x_i, x_{ji})/[\rho(x_i, x_{pi}) - \rho(x_i, x_{ji})], & x_i \notin x_{ji} \end{cases} \quad (6)$$

式中:  $k_j(x_i)$  为待评价物元第  $i$  个评价指标得分关于第  $j$  个评价等级的关联度;  $\rho(x_i, x_{ji})$  为点  $x_i$  与经典域物元区间  $x_{ji}$  的距;  $\rho(x_i, x_{pi})$  为点  $x_i$  与节域

物元区间  $x_{pi}$  的距;  $|x_{ji}|$  为区间  $x_{ji} = \langle a_{ji}, b_{ji} \rangle$  的模.

假设评价指标  $c_i$  的权重系数为  $\omega_i$ , 则待评价物元关于某等级的多指标综合关联度为:

$$K_j(N) = \sum_{i=1}^n \omega_i k_j(x_i) \quad (7)$$

$\max K_j(N)$  为对象  $N$  所属的评价等级. 为了在同一等级中区分对象的层次, 特引入级别偏向特征值  $j^*$ .  $j^*$  越大, 对象的优度就越高.

$$j^* = \frac{\sum_{j=1}^m j \overline{K_j(N)}}{\sum_{j=1}^m \overline{K_j(N)}} \quad (8)$$

其中:

$$\overline{K_j(N)} = \frac{K_j(N) - \min K_j(N)}{\max K_j(N) - \min K_j(N)} \quad (9)$$

## 2.3 综合评价模型

综合评价模型的建立过程如下:

步骤 1: 构建承包商绿色施工能力评价指标体系 (表 1).

步骤 2: 根据已建立的评价指标体系, 采用 2.2 中的方法, 确定经典域物元和节域物元.

步骤 3: 组织多名绿色施工方面的专家, 对表 1 中的各项指标进行打分. 打分后将专家的意见汇总, 计算各项得分的平均值, 确定待评价物元.

步骤 4: 将专家给出的平均值对应步骤 2 的等级, 转化为等级值, 得到信息系统  $S = (U, A, V, f)$ .

步骤 5: 对信息系统  $S = (U, A, V, f)$  中的评价指标消除冗余属性后, 得到简化的新信息系统  $S' = (U, A', V, f)$ .

步骤 6: 根据公式 (1)-(4), 计算信息系统  $S' = (U, A', V, f)$  中各指标的权重.

步骤 7: 提取信息系统属性的评价等级和专家打分结果, 构成新的经典域, 节域和待评价物元. 根

据公式 (5)-(6), 计算各承包商的关于各评价等级的多指标关联度.

步骤 8: 根据公式 (7), 计算承包商多指标综合关联度, 并判断承包商所属评价等级. 如果同一等级中存在多个承包商, 则根据公式 (9) 计算规范关联度, 根据公式 (8) 计算承包商级别偏向特征值. 最后结合承包商所属评价等级和级别偏向特征值, 选出最优承包商, 并根据各承包商单项指标隶属程度对他们提出改进建议.

## 3 实例分析

### 3.1 评价等级划分

根据已建立的评价指标体系 (表 1), 按照绿色施工能力从低到高, 依次划分评价等级为  $N_1-N_5$ . 具体等级得分如表 2 所示.

表 2 评价等级表

Tab.2 Rank table

评价等级	$N_1$	$N_2$	$N_3$	$N_4$	$N_5$
得分	[50,60)	[60,70)	[70,80)	[80,90)	[90,100)

### 3.2 确定待评价物元及信息系统

根据评价等级表, 可以确定各等级的经典域物元如下:

$$R_0 = \begin{bmatrix} N_1 & N_2 & N_3 & N_4 & N_5 \\ a_1 - a_{15} & [50,60) & [60,70) & [70,80) & [80,90) & [90,100) \end{bmatrix}$$

根据评价指标的整体取值范围, 确定节域物元如下:

$$R_p = [N_p \quad a_1 - a_{15} \quad [50,100)]$$

本次共有 15 家承包商参与评选, 评选邀请 7 位专家, 通过专家打分法, 得到各承包商关于各项指标的得分, 最后将 7 位专家的打分结果取平均值, 即得到待评价物元, 根据对应的评价等级, 形成信息系统  $S = (U, A, V, f)$ . 如表 3 所示.

表 3 待评价物元等级表

Tab.3 Material element to be evaluated rank table

		指标														
		$a_1$	$a_2$	$a_3$	$a_4$	$a_5$	$a_6$	$a_7$	$a_8$	$a_9$	$a_{10}$	$a_{11}$	$a_{12}$	$a_{13}$	$a_{14}$	$a_{15}$
对象	$x_1$	5	2	4	5	1	2	4	1	3	3	2	3	3	4	2
	$x_2$	2	5	4	4	3	5	1	4	1	2	3	3	1	2	3
	$x_3$	3	1	2	2	2	4	5	2	3	5	2	5	4	1	4
	$x_4$	4	2	4	5	1	2	4	1	3	3	2	3	3	4	2
	$x_5$	2	5	3	4	3	5	1	4	1	2	3	3	1	2	3
	$x_6$	1	1	3	3	4	2	4	4	3	2	3	2	1	5	3
	$x_7$	2	5	1	4	3	5	1	4	1	2	3	3	1	2	3
	$x_8$	3	1	2	2	2	3	5	2	3	5	2	5	4	1	4
	$x_9$	2	5	2	4	3	5	1	4	1	2	3	3	1	2	3
	$x_{10}$	3	1	2	2	2	2	5	2	3	5	2	5	4	1	4
	$x_{11}$	1	1	3	3	4	2	4	4	2	2	3	2	1	5	3
	$x_{12}$	5	2	4	5	2	2	4	1	3	3	2	3	3	4	2
	$x_{13}$	2	5	3	4	3	5	1	4	1	2	3	3	1	4	3
	$x_{14}$	3	1	2	2	2	4	5	2	3	5	2	2	4	1	4
	$x_{15}$	1	1	3	3	4	2	4	4	5	2	3	2	1	5	3

3.3 计算属性权重

由于

$$\begin{aligned} pos_{A-\{a_2\}}(U) &= pos_{A-\{a_4\}}(U) = pos_{A-\{a_7\}}(U) = \\ pos_{A-\{a_8\}}(U) &= pos_{A-\{a_{10}\}}(U) = pos_{A-\{a_{11}\}}(U) = \\ pos_{A-\{a_{13}\}}(U) &= pos_{A-\{a_{15}\}}(U) = \\ &\left\{ \begin{aligned} &x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6, x_7, x_8, \\ &x_9, x_{10}, x_{11}, x_{12}, x_{13}, x_{14}, x_{15} \end{aligned} \right\} \end{aligned}$$

对原信息系统  $S = (U, A, V, f)$  消除冗余属性后, 得到新的信息系统  $S' = (U, A', V, f)$ . 其中

$$A' = \{a_1, a_3, a_5, a_6, a_9, a_{12}, a_{14}\}.$$

根据公式(1)-(4), 计算指标权重, 如表 4 所示.

表 4 评价指标权重表

Tab.4 Evaluation weight table

评价指标	$a_1$	$a_3$	$a_5$	$a_6$	$a_9$	$a_{12}$	$a_{14}$
权重	0.111	0.222	0.111	0.167	0.167	0.111	0.111

3.4 计算待评价物元综合关联度

对信息系统  $S' = (U, A', V, f)$ , 提取待评价物元的相关指标, 并结合表 4 中的属性权重, 计算待评价物元关于某一评价等级各指标的关联度. 再将评价结果乘以各指标权重, 得到待评价物元关于该等级的综合关联度, 汇总待评价物元关于各评价等级的综合关联度, 并判断待评价物元所属等级, 如表 5 所示.

表 5 综合关联度表

Tab.5 Integrated correlation table

		等级					最大关联度等级
		$N_1$	$N_2$	$N_3$	$N_4$	$N_5$	
对象	$x_1$	-0.398	-0.342	-0.205	-0.159	-0.333	$N_4$
	$x_2$	-0.32	-0.337	-0.342	-0.311	-0.364	$N_4$
	$x_3$	-0.384	-0.211	-0.216	-0.318	-0.411	$N_2$
	$x_4$	-0.414	-0.321	-0.203	-0.063	-0.448	$N_4$
	$x_5$	-0.307	-0.238	-0.267	-0.374	-0.498	$N_2$
	$x_6$	-0.32	-0.22	-0.106	-0.282	-0.41	$N_3$
	$x_7$	-0.165	-0.409	-0.453	-0.563	-0.547	$N_1$
	$x_8$	-0.32	-0.182	-0.177	-0.41	-0.442	$N_3$
	$x_9$	-0.278	-0.141	-0.309	-0.528	-0.462	$N_2$
	$x_{10}$	-0.227	-0.053	-0.269	-0.488	-0.512	$N_2$
	$x_{11}$	-0.292	-0.144	-0.264	-0.398	-0.468	$N_2$
	$x_{12}$	-0.431	-0.144	-0.142	-0.224	-0.368	$N_3$
	$x_{13}$	-0.356	-0.25	-0.012	-0.22	-0.397	$N_3$
	$x_{14}$	-0.272	0.036 8	-0.161	-0.333	-0.544	$N_2$
	$x_{15}$	-0.426	-0.276	-0.264	-0.311	-0.374	$N_3$

3.5 计算级别偏向特征值

由表 5 可知, 承包商  $x_1, x_2, x_4$  都处于  $N_4$  级, 是表中的最高级别. 根据公式(8)-(9)计算他们的级别偏向特征值如表 6 所示.

表 6 级别偏向特征值

Tab.6 Level bias eigenvalues

对象	$x_1$	$x_2$	$x_4$
$j^*$	3.566 2	2.576 6	3.238 4

其中级别偏向特征值最大的为  $x_1$ , 故承包商  $x_1$  为本次评选的最优承包商, 接下来的排名顺序为  $x_4, x_2$ . 根据评价结果中各承包商单项指标的隶属程度, 可对他们提出改进建议.

4 结论

绿色施工是绿色建筑中的重要环节, 其中承包商的绿色施工能力评价是关键. 以选择承包商为目标, 以绿色施工能力为标准, 构建了一套评价选择模型, 取得以下成果:

(1) 将承包商自身能力指标与施工方案绿色度指标进行结合, 构建了绿色承包商评价指标体系,

该体系能够较全面地反映承包商的绿色施工能力.

(2) 利用粗糙集在权重获取过程中约简冗余属性, 简化评价指标, 与可拓方法有机结合, 构建出承包商绿色施工能力评价的综合模型.

当然, 这个评价模型的构建还有一些不足之处, 如评价指标中定性指标比较多, 可能会影响最终的评价结果, 今后还需在定性指标的科学定量化方面进一步研究.

参考文献 Reference

[1] GB/T50640-2010. 建筑工程绿色施工评价标准[S].北京:中国计划出版社, 2010.  
GB/T50640-2010. Green construction evaluation criteria[S]. Beijing: China Planning Press, 2010.

[2] 张俊强,周向阳,叶林富. 基于多模型集成的绿色施工方案评价方法[J]. 施工技术, 2013, 42(22):19-22.  
ZHANG Junqiang, ZHOU Xiangyang, YE Linfu. Evaluation method of green construction program based on multi-model integration [J]. Construction Technology, 2013,42(22):19-22.

[3] 闫志刚,杜立峰,王雪丽. 基于突变级数法的绿色施工评价研究[J]. 施工技术,2012, 41:25-29.  
YAN Zhigang, DU Lifeng, WANG Xueli. Study on green

- construction based on catastrophe progression Method [J]. Construction Technology, 2012,41:25-29.
- [4] 陈群. 灰色关联分析在最佳承包商选择中的应用[J]. 数学的实践与认识, 2009, 39(17): 48-53.  
CHEN Qun. Application of grey relativity analysis in best contractor selection[J]. Mathematics In Practice and Theory, 2009,39(17):48-53.
- [5] 住房和城乡建设部.绿色施工导则[S].2007.  
Ministry of Housing and Urban Rural Development Green Construction Guidelines[S].2007.
- [6] 杨传健,葛浩,汪志圣.基于粗糙集的属性约简方法研究综述[J].计算机应用研究, 2012,29(1):16-20.  
YANG Chuanjian, GE Hao, WANG Zhisheng. Overview of Attribute Reduction Based on Rough Set[J].Application Research of Computers, 2012, 29(1):16-20.
- [7] 张文修, 仇国芳.基于粗糙集的不确定决策[M].北京:清华大学出版社,2005.  
ZHANG Wenxiu, QIU Guofang. Uncertain Decision-making based on rough set [M]. Beijing: Tsinghua University Press,2005.
- [8] 钟嘉明, 李订芳. 基于粗糙集理论的属性权重确定最优化方法研究[J].计算机工程与应用,2008,44(20):51-53.  
ZHONG Jiaming, LI Tingfang. Research on optimization method of attribute weight determining based on rough set theory[J]. Computer Engineering and Applications, 2008,44(20): 51-53.
- [9] 何亚伯, 帅青燕. 基于可拓理论的绿色建筑综合评价[J]. 建筑科学,2012, 28(12):90-93.  
HE Yabo,SHUAI Yanqing. Comprehensive assessment on green building based on extension theory[J].Building Science, 2012,28(12):90-93.
- [10] 蔡文,杨春燕,何斌. 可拓逻辑初步[M]. 北京:科学出版社,2003.  
CAI Wen, YANG Chunyan, HE Bin. Extension Logic Preliminary[M].Beijing: Science Press,2003.

(编辑 吴海西)

(上接第 608 页)

- [6] 燕启社, 孙红文. Fenton氧化对土壤有机质及其吸附性能的影响[J]. 农业环境科学学报, 2006, 25(2): 412-417.  
YAN Qishe, SUN Hongwen. Influence of Fenton oxidation on soil organic matter and its sorption characteristics [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2006, 25(2): 412-417.
- [7] 赵丹, 廖晓勇, 阎秀兰, 等. 不同化学氧化剂对焦化污染场地多环芳烃的修复效果[J]. 环境科学, 2011, 32(3): 857-863.  
ZHAO Dan, LIAO Xiaoyong, YAN Xiulan, et al. Chemical oxidants for remediation of soils contaminated with polycyclic aromatic hydrocarbons at a coking site [J]. Environmental Science, 2011, 32(3): 857-863.
- [8] CHEN C T, TAFURI A N, RAHMAN M, et al. Chemical oxidation treatment of petroleum contaminated soil using Fenton's reagent [J]. Journal of Environmental Science and Health-Part A Toxic/Hazardous Substances and Environmental Engineering, 1998, 33(6): 987-1008.
- [9] ITRC (Interstate Technology & Regulatory Council). Technical and regulatory guidance for in situ chemical oxidation of contaminated soil and groundwater, Second Edition [R]. Interstate Technology & Regulatory Cooperation Work Group, Washington, D C. 2005.
- [10] 纪录, 张晖. 原位化学氧化在土壤和地下水修复中的研究进展[J]. 环境污染治理技术与设备, 2003,4(6): 37-42.  
JI Lu, ZHANG Hui. The progress in soil and groundwater remediation by in situ chemical oxidation [J]. Techniques and Equipment for Environmental Pollution Control, 2003, 4(6): 37-42.
- [11] 崔英杰, 杨世迎, 王萍, 等. Fenton 原位化学氧化法修复有机污染土壤和地下水的研究[J]. 化学进展, 2008, 20(7/8): 1196-1201.  
CUI Yingjie, YANG Shiyong, WANG Ping, et al. Organically polluted soil and groundwater remediation by in situ Fenton oxidation [J]. Progress in Chemistry, 2008, 20(7/8): 1196-1201.
- [12] SEOL Y, JAVANDEL I. Citric acid-modified Fenton's reaction for the oxidation of chlorinated ethylenes in soil solution systems [J]. Chemosphere, 2008(72): 537-542.
- [13] VENNY, GAN S, NG H K. Inorganic chelated modified-Fenton treatment of polycyclic aromatic hydrocarbon (PAH)-contaminated soils [J]. Chemical Engineering Journal, 2012(180): 1-8.
- [14] XU J, PANCARS T, GROTEHUIS T. Chemical oxidation of cable insulating oil contaminated soil [J]. Chemosphere, 2011, 84(2): 272-277.
- [15] SHERWOOD M K, CASSIDY D P. Modified Fenton oxidation of diesel fuel in arctic soils rich in organic matter and iron [J]. Chemosphere, 2014 (113): 56-61.
- [16] TSAI T T, KAO C M. Treatment of petroleum-hydrocarbon contaminated soils using hydrogen peroxide oxidation catalyzed by waste basic oxygen furnace slag [J]. Journal of Hazardous Materials, 2009, 170(1): 466-472.
- [17] WATTS R J, STANTON P C, HOWSA WKENG J, et al. Mineralization of absorbed polycyclic aromatic hydrocarbon in two soils using catalyzed hydrogen peroxide [J]. Water Research, 2002, 36(17): 4283-4292.
- [18] WALLING C. Fenton's reagent revisited [J]. Accounts of Chemical Research, 1975, 8(4): 125-131.
- [19] CHRISTENSEN H, SEHESTED K, CORFITZE N H. Reactions of hydroxyl radicals with hydrogen peroxide at ambient and elevated temperatures [J]. The Journal of Physical Chemistry, 1982, 86(9): 1588-1590.

(编辑 吴海西)