

文章编号: 1000-582X(2012)05-047-05

# AZ40 镁合金的腐蚀图像识别及腐蚀行为分析

刘立平<sup>a</sup>, 李凌杰<sup>b</sup>, 雷惊雷<sup>b</sup>, 贺东海<sup>b</sup>, 李芳君<sup>b</sup>, 张胜涛<sup>b</sup>, 潘复生<sup>c</sup>

(重庆大学 a. 土木工程学院; b. 化学化工学院; c. 材料科学与工程学院, 重庆 400044)

**摘要:**应用计算机图像识别技术研究了 AZ40 镁合金在模拟海水介质中的腐蚀行为。采用中值滤波、直方图均衡化方法对腐蚀图像进行预处理,通过数学形态学分析和小波分析提取了 3 个腐蚀图像特征参数:灰度分布方差、二值图像前景面积和能量特征参数用于全面、准确地描述镁合金的腐蚀行为。研究表明:腐蚀介质破坏镁合金表面自然氧化膜使腐蚀阻力减小;腐蚀由局部腐蚀开始快速扩展至全部区域;腐蚀产物堆积较慢,短时间不能为合金提供有效的保护,但随着长时间的堆积则可增大腐蚀阻力,对合金产生一定的保护作用。

**关键词:**镁合金;腐蚀;图像识别;数学形态学;小波分析

**中图分类号:** TG146. 22; TG172. 5

**文献标志码:** A

## Corrosion image recognition and corrosion behavior analysis of AZ40 magnesium alloy

LIU Li-ping<sup>a</sup>, LI Ling-jie<sup>b</sup>, LEI Jing-lei<sup>b</sup>, HE Dong-hai<sup>b</sup>,  
LI Fang-jun<sup>b</sup>, ZHANG Sheng-tao<sup>b</sup>, PAN Fu-sheng<sup>c</sup>

(a. College of Civil Engineering; b. College of Chemistry & Chemical Engineering;  
c. College of Materials Science & Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, P. R. China)

**Abstract:** The corrosion behavior of AZ40 magnesium alloy is studied based on image recognition technique. The corrosion images of AZ40 magnesium alloy in simulated sea water are pre-processed by median filter and histogram equilibrium methods. The mathematical morphology and wavelet transformation are used to analyze the pre-processed images. Three parameters, the grayscale distribution variance, foreground area of binary image and energy feature are extracted to describe the corrosion behavior of AZ40 magnesium alloy comprehensively and exactly. Results indicate that the natural oxide film on the magnesium alloy's surface is destroyed by corrosive medium, which makes the corrosion resistance decrease. The corrosion starts from local area, spreads rapidly and develops into general corrosion. Insoluble corrosion products precipitate slowly and provide little protection to the alloy in short period. However, after long time precipitation, the insoluble corrosion products can increase the corrosion resistance and provide protection.

**Key words:** magnesium alloy; corrosion; image recognition; mathematical morphology; wavelet analysis

**收稿日期:** 2011-12-28

**基金项目:** 国家杰出青年科学基金资助项目(50725413);重庆市自然科学基金资助项目(CSTC, 2009BA4023);中央高校基本科研业务费资助项目(CDJXS11221173)

**作者简介:** 刘立平(1972-),男,重庆大学副教授,博士,主要从事数值仿真研究。

李凌杰(联系人),女,重庆大学教授,博士生导师,(E-mail)ljli@cqu.edu.cn。

镁合金作为最轻的金属结构材料,在很多领域具有广阔的应用前景,但耐腐蚀性能差是阻碍其广泛应用、限制其发展的瓶颈问题<sup>[1]</sup>。因此,研究镁合金在一些典型环境中的腐蚀行为及规律对于指导其加工制造工艺的改进,提高其耐蚀性能,推动其应用具有重要作用。

研究镁合金腐蚀行为及规律的方法主要有电化学方法及失重法等,这些方法虽然可以提供较多镁合金腐蚀的信息,但存在实验结果不直观、不能准确反映局部腐蚀特征的缺点<sup>[1]</sup>。镁合金在腐蚀过程中必定伴随形貌的改变,腐蚀形貌可以在一定程度上真实而直观地反映镁合金的腐蚀特征,但由于目前对于镁合金腐蚀图像的分析还停留在肉眼观察、定性描述的阶段,因而无法实现定量分析镁合金的腐蚀特征,并且存在分析结果不可靠、准确度低的缺点。利用高度发展的计算机图像识别技术,则可以轻易地分辨较高的图像灰度级,进行图像特征提取和分析,从而有助于显著提高分析结果的可靠性和准确度。一些学者利用计算机图像识别技术研究了锌、钢铁、铝、铜等金属及合金在大气、土壤、酸雨等环境中的腐蚀情况<sup>[2-13]</sup>,但对于镁合金的腐蚀图像识别目前还未见文献报道。另外,在目前的腐蚀图像研究中,通常采用小波分析或数学形态学分析中的其中一种方法提取图像的某一特征参数,如利用小波分析提取腐蚀图像的能量特征参数 $\lambda$ 进行分析<sup>[3,5,7-10]</sup>,而单一特征参数往往难以全面、准确地描述金属的腐蚀行为。

笔者综合利用数学形态学分析和小波分析对 AZ40 镁合金在模拟海水介质中浸泡不同时间的腐蚀形貌图像进行了识别和分析,提取了 3 个腐蚀图像特征参数用于全面、准确地描述镁合金的腐蚀行为,并运用典型相关性分析方法对其中的能量特征参数 $\lambda$ 与笔者前期利用电化学阻抗谱方法得到的腐蚀阻力参数 $R_p$ <sup>[14]</sup>的相关程度进行了分析,从而建立了一种可靠的基于图像识别技术的镁合金腐蚀行为研究方法。

## 1 腐蚀图像的获取及预处理

### 1.1 腐蚀图像的获取

#### 1.1.1 腐蚀试样的制备

研究材料为重庆镁业有限公司提供的铸态 AZ40 镁合金。腐蚀实验前,试样工作面依次经 100<sup>#</sup>,300<sup>#</sup>,600<sup>#</sup>,1000<sup>#</sup>,1400<sup>#</sup> 水砂纸逐级打磨至平整,然后在丙酮中超声清洗 3 min,取出后用蒸馏水冲洗、冷风吹干。

浸泡腐蚀实验条件为:腐蚀介质为模拟海水,由分析纯 NaCl 试剂和蒸馏水配制成 3.5% NaCl 溶液;浸泡时试样工作面积和腐蚀介质体积的比例为 1 cm<sup>2</sup>:80 mL(cm<sup>3</sup>),浸泡时间为 0~9 h,实验温度为室温。

#### 1.1.2 腐蚀试样表面形貌图像的获取

将在腐蚀介质中浸泡不同时间的 AZ40 镁合金试样取出后用蒸馏水冲洗、冷风吹干,用日本 OLYMPUS-GX41 显微镜获取腐蚀试样的表面形貌图像(平行腐蚀试样 3 个,同一试样观察区域不少于 5 处)。图 1 示出采集的代表性原始图像(图中编号代表在腐蚀介质中的浸泡时间(h),余同)。

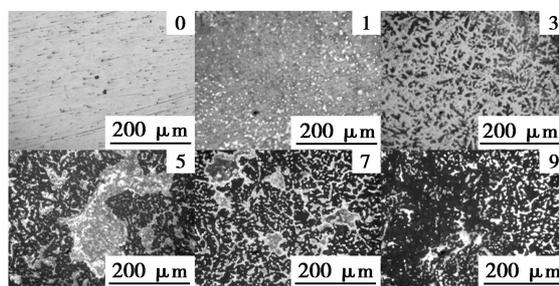


图 1 AZ40 镁合金腐蚀形貌的原始图像

### 1.2 腐蚀图像的预处理

由于原始图像一般含有随机噪声且亮度也不相同,因此会影响特征值的提取。所以首先需要对腐蚀图像进行中值滤波和直方图均衡化预处理<sup>[5,8-9]</sup>。中值滤波能够抑制图像的随机噪声,同时不使边缘模糊。直方图均衡化则可以将原始图像不均衡的直方图变换为均匀分布的形式,消除亮度不同的影响,还可以达到增强图像整体对比度的效果,有利于后续图像特征的提取。文中采用 Photoshop 软件处理图像,采用 Matlab 编程分析图像、提取图像特征。

预处理后的 AZ40 镁合金腐蚀图像如图 2 所示。

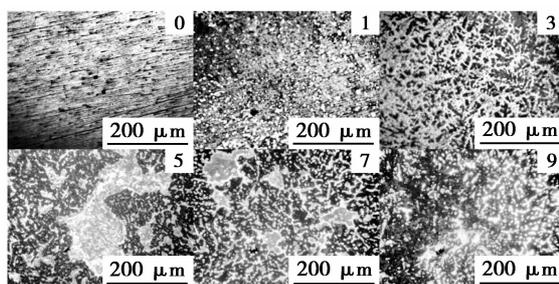


图 2 经预处理后的 AZ40 镁合金腐蚀图像

## 2 腐蚀图像的数学形态学分析

### 2.1 灰度分布分析

腐蚀图像的灰度值可以反映腐蚀的严重程度:灰度值越小,腐蚀越严重;反之,腐蚀越轻微<sup>[6]</sup>。因此对腐蚀图像中所有像素点的灰度值做方差计算,得到的灰度分布方差 STD 便能反映腐蚀图像灰度分布的离散程度即腐蚀形貌的均匀性。

AZ40 镁合金腐蚀图像的灰度分布方差 STD 随腐蚀时间  $t$  的变化曲线如图 3 所示。可按幂函数  $D=At^n$  ( $A, n$  为常数) 进行回归分析,所得回归系数  $A$  为 0.103 4,  $n$  为 0.385 3, 相关系数  $R^2$  为 0.976 6, 表明回归方程有较好的相关性。一般认为,  $n$  值受材料的特性和环境因素影响<sup>[8]</sup>,  $n$  值越大反映图像的灰度分布方差变化率越大。从 STD 随腐蚀时间  $t$  的变化及  $n$  值较少可以推测:在模拟海水介质中 AZ40 镁合金的腐蚀由局部腐蚀开始,随着腐蚀时间延长,腐蚀不断发生并发展至全部区域,腐蚀形貌的不均匀性随腐蚀时间延长而增大但变化幅度越来越小。

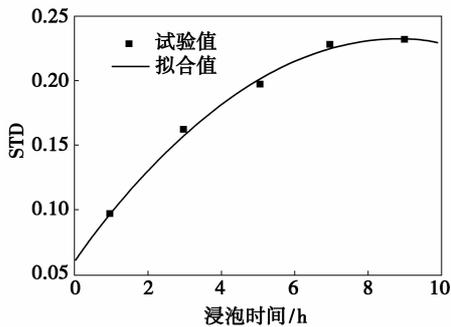


图 3 AZ40 镁合金腐蚀图像的灰度分布方差随浸泡时间的变化

### 2.2 二值化处理和分

对腐蚀图像进行二值化处理可以获得未腐蚀或腐蚀较轻区域的面积即二值图像的前景面积 Area, 从而可反映腐蚀发生的严重程度<sup>[4]</sup>。笔者主要采用自动阈值法 (Otsu 法<sup>[4]</sup>) 对腐蚀图像进行二值化处理和分

AZ40 镁合金腐蚀二值图像的前景面积 Area 随腐蚀时间  $t$  的变化曲线如图 4 所示,基本呈线性趋势减小。由此说明:AZ40 镁合金在模拟海水介质中的腐蚀扩展很快,腐蚀区域不断扩大基本呈线性变化,也反映出腐蚀产物堆积较慢、短时间不能为合金提供有效的保护作用。腐蚀 1 h 的图像前景面积出现异常,推测可能与此时腐蚀的形式主要为点蚀,蚀坑处灰度值明显大于其他区域,因而确定的阈值偏

大而导致计算的前景面积偏小。

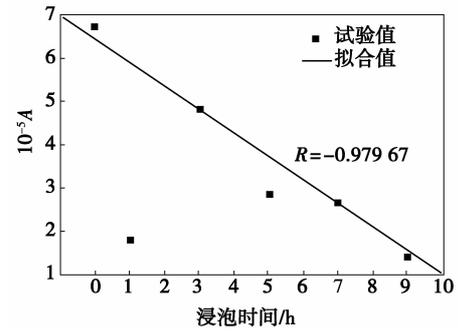


图 4 AZ40 镁合金腐蚀二值图像的前景面积随浸泡时间的变化

## 3 腐蚀图像的小波分析

对腐蚀图像进行小波变换可得到不同尺度的子图像,每个子图像的特征值组成反映腐蚀形貌的特征向量,目前报道最多的是能量特征向量<sup>[3,5,7-10]</sup>。选择 DB 系 db1 小波对 AZ40 镁合金腐蚀图像进行分解,图 5 以 AZ40 镁合金腐蚀 5 h 的图像为例,显示了对其进行小波变换得到的各子图像,进而通过以下公式可计算得到每个子图像的特征能量值为<sup>[3,5,7-10]</sup>

$$E = \sum_{i=0}^{255} P(i)^2, \quad (1)$$

式中:  $P(i)$  为图像中像素值为  $i$  的点占总像素点的比值。  $E_{H1}$ 、 $E_{H2}$ 、 $E_{H3}$  和  $E_{V1}$ 、 $E_{V2}$ 、 $E_{V3}$  及  $E_{D1}$ 、 $E_{D2}$ 、 $E_{D3}$  分别为水平方向、垂直方向及对角方向进行 1、2、3 水平小波变换后得到的子图像的特征能量值。表 1 列出了 AZ40 镁合金不同腐蚀图像经小波变换后得到的各子图像的特征能量值。

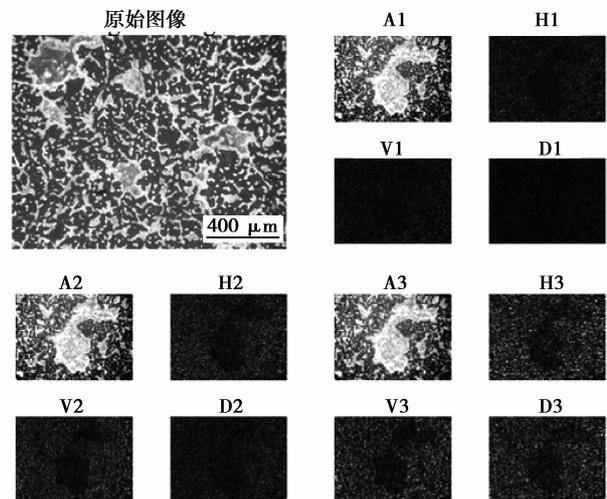


图 5 AZ40 镁合金腐蚀 5 h 的图像及对其进行小波变换得到的子图像

表 1 AZ40 镁合金不同腐蚀图像的各子图像能量特征值

浸泡 时间/h	能量特征值								
	$E_{H1}$	$E_{V1}$	$E_{D1}$	$E_{H2}$	$E_{V2}$	$E_{D2}$	$E_{H3}$	$E_{V3}$	$E_{D3}$
0	0.065 5	0.101 4	0.153 0	0.015 8	0.027 9	0.021 7	0.011 5	0.022 5	0.013 0
1	0.067 0	0.076 3	0.172 9	0.016 0	0.019 7	0.023 8	0.010 0	0.011 7	0.012 7
3	0.074 7	0.074 4	0.173 9	0.017 8	0.016 6	0.024 7	0.010 3	0.010 0	0.012 4
5	0.085 1	0.087 6	0.178 2	0.015 8	0.015 6	0.024 6	0.011 4	0.013 6	0.012 3
7	0.087 5	0.085 8	0.171 0	0.019 6	0.019 6	0.024 7	0.011 5	0.011 6	0.013 8
9	0.097 8	0.078 4	0.187 0	0.024 9	0.021 3	0.033 6	0.014 1	0.013 3	0.019 7

对不同腐蚀图像的各子图像特征能量值求极差  $B(i) = \text{Max}\{|E_{H(i)} - E_{V(i)}|, |E_{H(i)} - E_{D(i)}|, |E_{V(i)} - E_{D(i)}|\}$  (其中  $i=1, 2, 3$ ) 可以得到各腐蚀子图像的能量特征值  $B(i)$ , 结果列于表 2。表 2 还列出了对应条件下采用电化学阻抗谱方法得到的腐蚀阻力参数  $R_t$  [14]。

表 2 能量特征值  $B$  及腐蚀阻力参数  $R_t$ 

浸泡 时间/h	能量特征值			$R_t$ /( $\Omega \cdot \text{cm}^2$ )
	$B(1)$	$B(2)$	$B(3)$	
0	0.087 5	0.012 1	0.011 0	288.3
1	0.105 9	0.007 8	0.002 6	112.8
3	0.099 6	0.008 0	0.002 3	94.93
5	0.093 1	0.009 1	0.002 2	91.77
7	0.085 2	0.005 2	0.002 4	97.44
9	0.108 6	0.012 3	0.006 4	111.1

用典型相关分析法 [3, 5, 7, 9, 10, 15] 研究腐蚀子图像能量特征值  $B(1)$ 、 $B(2)$ 、 $B(3)$  与腐蚀阻力参数  $R_t$  之间的相关程度。典型相关系数  $\rho$  代表两组变量的最大关系程度, 典型变量中的系数因子  $|b_1|$ 、 $|b_2|$ 、 $|b_3|$  分别反映相关系数最大时图像特征值  $B(1)$ 、 $B(2)$ 、 $B(3)$  的贡献率, 结果如表 3 所示。

表 3 典型相关性分析结果

$ b_1 $	$ b_2 $	$ b_3 $	$\rho/\%$
0.132 0	0.267 9	1.151 8	95.41

由表 3 可以看出, 不同频率和方向的能量特征值的贡献率不同, 因此需要对特征值进行加权处理以得到可反映腐蚀图像综合能量特征的参数  $\lambda$ ,  $\lambda$  为各子图像能量特征值的加权 [3, 5, 7-10], 即

$$\lambda = |b_1| * B(1) + |b_2| * B(2) + |b_3| * B(3), \quad (2)$$

计算结果如表 4 所示。

表 4 AZ40 镁合金腐蚀图像的能量特征参数  $\lambda$ 

浸泡 时间/h	0	1	3	5	7	9
$\lambda$	0.027 5	0.019 1	0.018 0	0.017 3	0.015 3	0.025 0

从表 4 可以看出, 能量特征参数  $\lambda$  呈迅速减小、缓慢减小然后增大的变化趋势。由此推测: 腐蚀介质破坏镁合金表面自然氧化膜使腐蚀阻力迅速减小, 腐蚀快速扩展, 不溶性腐蚀产物在合金表面堆积较慢, 短时间内并不能有效覆盖腐蚀活性点, 但随着腐蚀产物在合金表面的较多堆积, 一些腐蚀活性点被覆盖从而增大了腐蚀阻力, 对合金产生一定的保护作用, 因此在腐蚀 9 h 时  $\lambda$  反而增大。

综合分析 STD、Area 及  $\lambda$  3 个腐蚀图像特征参数可得出: 腐蚀介质破坏镁合金表面自然氧化膜使腐蚀阻力减小; 腐蚀由局部腐蚀开始快速扩展至全部区域; 腐蚀产物堆积较慢, 短时间不能有效覆盖腐蚀活性点, 但随着较长时间的堆积则可增大腐蚀阻力, 对合金产生一定的保护作用。

## 4 结 论

1) 对腐蚀图像进行数学形态学分析, 提出了灰度分布方差(STD)和二值图像前景面积(Area)2 个特征参数: STD 随腐蚀时间延长呈幂函数变化说明腐蚀由局部腐蚀开始快速发展至全部区域; Area 随腐蚀时间延长呈线性减小说明腐蚀区域不断扩大基本呈线形变化, 也反映出腐蚀产物堆积较慢, 短时间不能为合金提供有效的保护作用。

2) 对腐蚀图像进行小波分析, 计算了能量特征值  $B$ , 并与电化学阻抗谱结果中的腐蚀阻力参数  $R_t$  进行了典型相关性分析, 典型相关系数  $\rho$  高达

95.41%,说明  $B$  与  $R_i$  具有很高的相关性。在此基础上对特征值  $B$  进行加权处理,提出了能量特征参数  $\lambda$ ,  $\lambda$  随腐蚀时间延长呈迅速减小、缓慢减小然后增大的变化趋势,说明腐蚀介质破坏镁合金表面自然氧化膜使腐蚀阻力减小、腐蚀快速扩展,但随着腐蚀产物在合金表面的缓慢堆积,较长时间后可覆盖一些腐蚀活性点、增大腐蚀阻力。

3)提出的3个腐蚀图像特征参数 STD、Area 和  $\lambda$ ,可以全面、准确地描述 AZ40 镁合金在模拟海水介质中的腐蚀行为,所建立的腐蚀图像分析方法具有很高的可靠性,可推及应用于其他腐蚀体系。

#### 参考文献:

- [1] 宋光铃. 镁合金腐蚀与防护[M]. 北京: 化学工业出版社, 2006.
- [2] ZIMER A M, RIOS E C, MENDES P D C, et al. Investigation of AISI 1040 steel corrosion in  $H_2S$  solution containing chloride ions by digital image processing coupled with electrochemical techniques [J]. Corrosion Science, 2011, 53(10): 3193-3201.
- [3] WANG S Y, SONG S Z. Image analysis of atmospheric corrosion exposure of zinc [J]. Materials Science and Engineering A, 2004, 385(1/2): 377-381.
- [4] CHOI K Y, KIM S S. Morphological analysis and classification of types of surface corrosion damage by digital image processing [J]. Corrosion Science, 2005, 47(1): 1-15.
- [5] 宋诗哲, 陶蕾, 王守琰, 等. LC4CS 铝合金模拟加速腐蚀试样的图像分析[J]. 金属学报, 2006, 42(4): 426-430.
- SONG SHI-ZHE, TAO LEI, WANG SHOU-YAN, et al. Image analysis of LC4CS aluminum alloy sample corroded acceleratively in simulated environment [J]. Acta Metallurgica Sinica, 2006, 42(4): 426-430.
- [6] 许述剑, 翁永基. 图像灰度与腐蚀特征的相关性研究[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2006, 26(6): 321-324.
- XU SHU-JIAN, WENG YONG-JI. Relativity between image grayscale and corrosion characteristics [J]. Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection, 2006, 26(6): 321-324.
- [7] TAO L, SONG S Z, WANG S Y, et al. Image analysis of periodic rain accelerated corrosion of aeronautical aluminium alloys [J]. Materials Science and Engineering A, 2008, 476(1/2): 210-216.
- [8] 陶蕾, 宋诗哲, 张晓云, 等. 铝合金大气腐蚀现场暴露试样的图像分析[J]. 科学通报 2008, 53(23): 2856-2859.
- TAO LEI, SONG SHI-ZHE, ZHANG XIAO-YUN, et al. Image analysis of atmospheric corrosion exposure of aluminium alloys [J]. Chinese Science Bulletin, 2008, 53(23): 2856-2859.
- [9] TAO L, SONG S Z, ZHANG X Y, et al. Image analysis of atmospheric corrosion of field exposure high strength aluminum alloys [J]. Applied Surface Science, 2008, 254(21): 6870-6874.
- [10] 许述剑, 翁永基, 刘小辉. 碳钢土壤腐蚀试样小波图像特征与腐蚀参数的相关性研究[J]. 腐蚀科学与防护技术, 2009, 21(5): 429-432.
- XU SHU-JIAN, WENG YONG-JI, LIU XIAO-HUI. Correlations between wavelet image features and corrosion parameters for carbon steel corroded in soil [J]. Corrosion Science and Protection Technology, 2009, 21(5): 429-432.
- [11] LEIVA-GARCÍA R, MUÑOZ-PORTERO M J, GARCÍA-ANTÓN J. Evaluation of Alloy 146, 279, 900, and 926 sensitization to intergranular corrosion by means of electrochemical methods and image analysis [J]. Corrosion Science, 2009, 51(9): 2080-2091.
- [12] PIDAPARTI R M, AGHAZADEH B S, WHITFIELD A, et al. Classification of corrosion defects in NiAl bronze through image analysis [J]. Corrosion Science, 2010, 52(11): 3661-3666.
- [13] GARCIA-OCHOA E, CORVO F. Copper patina corrosion evaluation by means of fractal geometry using electrochemical noise (EN) and image analysis [J]. Electrochemistry Communications, 2010, 12(6): 826-830.
- [14] 李凌杰, 于生海, 雷惊雷, 等. AZ40 镁合金在模拟海水介质中的腐蚀行为[J]. 重庆大学学报, 2008, 31(6): 702-706.
- LI LING-JIE, YU SHENG-HAI, LEI JING-LEI, et al. Corrosion behavior and mechanism of AZ40 magnesium alloy in simulated sea water [J]. Journal of Chongqing University, 2008, 31(6): 702-706.
- [15] 李静萍, 谢邦昌. 多元统计分析: 方法与应用[M]. 北京: 中国人民大学出版社, 2008.

(编辑 张 苹)