

doi:10.3969/j.issn.1673-9833.2020.01.011

# 基于体素的形态学分析方法在 ADHD 中的应用

王 涛, 徐余月, 李 青, 汤建新

(湖南工业大学 生命科学与化学学院, 湖南 株洲 412007)

**摘 要:** 研究已成年 ADHD 个体与正常人的脑区差异, 通过运用基于体素的形态学分析方法 (VBM) 对脑结构性磁共振结果进行定量分析, 研究发现 ADHD 患者组与正常组存在多个差异脑区。因此, 通过对患者进行相关差异脑区的早期干预治疗是一种潜在的治疗方案。

**关键词:** 磁共振成像; 注意力缺陷多动障碍; 体素; 形态学分析方法

**中图分类号:** R749      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1673-9833(2020)01-0065-05

**引文格式:** 王 涛, 徐余月, 李 青, 等. 基于体素的形态学分析方法在 ADHD 中的应用 [J]. 湖南工业大学学报, 2020, 34(1): 65-69, 76.

## Application of Voxel-Based Morphological Analysis Method in ADHD

WANG Tao, XU Yuyue, LI Qing, TANG Jianxin

(College of Life Sciences and Chemistry, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412007, China)

**Abstract:** An inquiry has been made into different brain regions between adult ADHD and normal individuals, followed by a quantitative analysis of brain structural magnetic resonance results by using voxel-based morphological (VBM) analysis. It is found that there are many different brain regions between ADHD patients and normal people. Therefore, it is suggested that an early intervention in patients with relevant differential brain regions may be a potential treatment method.

**Keywords:** magnetic resonance imaging; attention deficit hyperactivity disorder; voxel; morphometry

### 1 研究背景及发展现状

注意力缺陷多动障碍 (attention deficit/hyperactivity disorder, ADHD) 是儿童期最为常见的一种心理行为障碍<sup>[1]</sup>。在不同背景下, ADHD 检出率为 5%~20%<sup>[2]</sup>, 其中学龄前儿童发病率约为 3%~7%<sup>[3]</sup>, 约为 31%~45% 的 ADHD 患儿同时表现有学习障碍

(learning disability, LD)<sup>[4]</sup>。成年后的 ADHD 患者主要症状为不能很好地规划日常生活和简单工作, 甚至会发展成为反社会倾向人格障碍, 对家人和社会安全造成负担<sup>[5]</sup>。因此, 对 ADHD 患者病症尽早做出判定并施加一定干预十分必要。

磁共振成像 (magnetic resonance imaging, MRI) 是一种较有效的神经影像检测手段, 通过它可以实

收稿日期: 2019-03-21

基金项目: 国家自然科学基金资助面上项目 (61171061), 湖南工业大学“绿色包装与安全”专项研究基金资助项目 (2017ZBLY14)

作者简介: 王 涛 (1995-), 男, 河南项城人, 湖南工业大学硕士生, 主要研究方向为生物传感与生化分析, E-mail: 1076985802@qq.com

通信作者: 汤建新 (1965-), 男, 湖南株洲人, 湖南工业大学教授, 博士, 博士生导师, 主要从事功能纳米材料, 环境生物技术, 生物芯片与传感器方面的教学与研究, E-mail: 2428527171@qq.com

现对大脑结构和功能的在体评估<sup>[6]</sup>。然而MRI无法同时获取影像和病理诊断信息,所以对磁共振成像的后期处理分析显得格外重要。对神经影像学数据作进一步的处理分析技术包括感兴趣区域法(region of interest, ROI)<sup>[7]</sup>、基于体素的形态学分析方法(voxel-based morphometry, VBM)等。然而ROI法需要先设置感兴趣的脑区,但应表征的异常脑区或许只占ROI的一部分,或者跨越不同的ROI,此时应用ROI将会影响后期的分析,所以VBM就成为较ROI更优的选择<sup>[8]</sup>。

VBM方法于2000年被正式提出<sup>[9]</sup>。其优势在于,它不仅能够提供所检测脑组织的正常分布信息,而且能量化记录和疾病有关的脑区结构的病理信息<sup>[10-11]</sup>。因此,本文拟通过利用VBM在结构性磁共振上的分析优势,系统地对ADHD患者与正常人群进行相关的对比探究。

## 2 基于体素的形态学分析方法

VBM是一种以体素为最小研究对象的方法(体素可以理解为类似于像素的一种三维图像的最小组分),对磁共振图像应用VBM方法进行分析,能够定量检测各脑区的体积和特征,并通过对比得到脑区体积的差异。VBM的优势明显:首先,VBM不需要预先选取感兴趣区,它直接对全脑进行组间比较,而且可以定量地(通过体素的数量)检测出差异脑区的相差程度;另外,VBM具有相对固定的处理过程和分析方式,所以能够很大程度上减小实际操作过程造成的误差。然而VBM也存在不足:VBM分析方法在空间标准化过程中,若个别脑区和预先确定的模板匹配程度低,则会导致分析结果出现一定的误差,因此要注意脑区与模板的匹配;除此之外,在具体脑区分割过程中,不同脑组织成分交界区容易产生伪影。VBM对于一些脑部微小复杂结构的区分度很大程度上取决于最小单位体素的大小设置,因此选择合理的体素大小十分重要。

VBM是一种基于全脑的自动化分析技术,应用计算机对神经影像学相关原始图像数据(研究中具体牵涉的数据格式见3.1.1图像的标准化和分割)进行自动化处理,且最大程度减少人为误差,它能够对全脑的灰质和白质进行分析,具有较高的客观性和可重复性,能够较为全面地评估患者脑组织形态变化<sup>[12]</sup>。目前,主要应用的VBM技术多是优化过的VBM技术,它能够对研究的样本群体选择合适的标配模板<sup>[13]</sup>,与传统的VBM技术相比,该技术减少了系

统自带模板所造成的误差。另外,经检测的组织密度经自动化的平滑处理之后,能够转化为体积,从而方便了数据的后续比较与分析<sup>[12]</sup>。自动化处理的理论过程如下(具体的操作过程见“3数据处理与结果讨论”部分)。

### 2.1 空间标准化

空间标准化能够将各个备试对象的脑部MRI原始图像转置到一个预定的立体空间。此过程将MRI原始图像与预定模板图像的灰度值平方和进行最小化处理。首先,对12个仿射变换参数与匹配图像的区域大小和相应位置进行估计;然后,通过非线性变换来进行脑结构局部差异的校正;最后,进行整个脑部的形状匹配。

空间标准化,即通过对图像的变形,以达到差别个体脑的相同脑区能被尽可能地匹配的目的,但是该过程并非点对点的精准对应。具体实行时务必提高匹配的水准,但选择模板要以不影响最终结果的正确性为准,一般要求经标准化后的MRI图像具有较高的分辨率。

### 2.2 分割

按照预先设定的参数将标准化后的MRI图像分割成若干小集合,这些独立的小集合都在一定的条件下具有同质性。分割后的小集合就是脑组织的不同组分:白质、灰质、脑脊液等。简而言之,就是将标准化后的脑结构磁共振图像类比为—个由几种不同成分组成的整体,这些组分均匀并且不互相干扰,此时就能够使用统计学方法进行差异表征。

### 2.3 平滑

对分割后的脑组分进行平滑处理能够提高图像的信噪比,而提高信噪比的目的在于进行数据对比时能够使图像在较为合理的空间标度内。为提高统计检验的有效性,应尽量选择趋于正态分布的数据,而平滑处理能够实现数据的正态化分布。平滑处理最常使用的方式是将待检测的图像与三维高斯核进行离散卷积处理。

### 2.4 统计建模和假设检验

VBM对不同的体素选择相同的模型,但设置不同的参数向量。通过进行参数的估计和统计量的计算,可得到对应的统计参数映射图,选择合理的对比度进行假设检验,最终结果以报告的形式显示具有显著差异的脑区。

常用的统计模型有协方差分析、双样本T检验等。由于多数的统计模型均是以广义线性模型为基础的,所以在实际应用的时候要注意选取<sup>[10]</sup>。

### 3 数据处理与结果讨论

#### 3.1 数据的选取

课题组在 1 000 Functional Connectomes Project (FCP) 选取数据, 最终选定两组备试对象。由于具体实现过程中的主客观原因, 无法实现对当地样本的采样, 因此选择 FCP 这样的网络公开数据库。由于网络公开数据库的选样范围有限, 最终选取两组实验对象中 A 组为 ADHD 患者组、B 组为正常对照组。通过两组实验数据最终的对比, 探究 ADHD 患者的差异脑区。

具体参数设置: Group A 为 NewYork\_a\_ADHD, 组内共 25 名研究对象 (19 名男性, 4 名女性), 年龄范围为 20~50, TR 取值为 2, slices 取值为 39, timepoints 取值为 192; Group B 为 NewYork\_a, 组内共 84 名研究对象 (43 名男性, 41 名女性), 年龄范围为 7~49 岁, TR、slices 及 timepoints 的取值同 Group A。

两组备试对象通过对 MRI 图像的 T1 像应用基于体素的形态学分析技术, 对比得出显著差异脑区。进行性别 (拟采用每组选取 5 名男性、4 名女性) 和年龄筛选 (选择 20~40 岁范围内对象进行比较), 最终选定的备试对象分为两组: Group A 选择 ADHD 患者, 共 9 名。其中 5 名男性对象, 年龄分别为 24, 26, 26, 26, 32 岁; 4 名女性对象, 年龄分别为 20, 23, 24, 24 岁。Group B 选择正常对照组, 共 9 名。其中 5 名男性对象, 年龄分别为 21, 23, 30, 31, 34 岁; 4 名女性对象, 年龄分别为 20, 21, 23, 28 岁。

##### 3.1.1 图像的标准化和分割

研究过程中主要应用 SPM8、Xjview (基于 Matlab 的应用软件包) 对图像进行一系列处理。

首先进行图像的标准化和分割 (选择 MRI 原始图像, 格式为 .nii; 该过程通过 SPM8 的 Estimate and write 操作实现), 处理后新生成 5 个文件, 分别如下: 2 个 m0 打头的 .nii 文件 (m0wp1 对应处理后的脑灰质, m0wp2 为处理后的脑白质); 1 个 .mat 文件 (分割矩阵); 1 个 .txt 文件 (文件中第 1~3 列依次为分割后灰质、白质、脑脊液体积); 1 个 wm 打头的文件 (标准化后的 T1 加权像)。

##### 3.1.2 处理后图像的质量评估和剔除

通过 Display one slice for all images 统一显示所有备试对象 T1 像的相同图层, 以便进行初步的筛选, 且每个备试对象显示的图层上可标注对应的编号便于待测对象的选取。之后进行样本一致性分析, 通过协方差样本一致性分析, 可以定量地进行样本之间的

一致性/均质性分析, 通过该分析达到非最佳备试对象的剔除。

通过对分析结果的观察 (在 SPM8 中进行 Check sample homogeneity using covariance 操作), 最终筛选决定: Group A 选 ADHD 患者共 8 名。其中 4 名男性对象年龄分别为 24, 26, 26, 32 岁; 4 名女性对象年龄分别为 20, 23, 24, 24 岁。Group B 选择正常对照组共 7 名。其中 3 名男性对象年龄分别为 23, 31, 34 岁; 4 名女性对象年龄分别为 20, 21, 23, 28 岁。

#### 3.2 图像的平滑

选择 m0wp1\* 进行平滑操作 (过程通过 SPM8 中的 Smooth 选项实现), 采用默认参数。新生成 sm0\* 打头文件, 即为平滑后的灰质图像。

#### 3.3 双样本 T 检验

通过 Specify 2nd-level 进行 two sample t-text, 进行组间灰质差异比较。具体参数设置见表 1。

表 1 具体参数设置

Table 1 Specific parameter settings

参数名称	参数值
Directory	SPM .mat (设计矩阵文件) 将写入的位置
Design	选择 "Two sample t-test"
Group 1 scans	选择 Group A (ADHD 组) 选择文件 "sm0wp1*"
Group 2 scans	选择 Group B (对照组) 选择文件 "sm0wp1*"
Independence	Yes
Variance	Equal
Grand mean scaling	No
ANCOVA	No
Masking:ThresholdMasking	Absolute: 0.2
Implicit Mask	Yes
Explicit Mask	<None>
Global Calculation	Omit
Global Normalization	Overall grand mean scaling:No
Normalization	None

#### 3.4 结果的估计

选择在 3.3 节中生成的 SPM.mat 文件进行估计 (通过 SPM8 中 Estimate 操作进行)。之后定义 Contrast: 选择定义 t。具体选择应根据实验目的进行设定。当设定为 [1 -1], 即 only+ 效应, 具体可以理解为 Group A>Group B 显示出的是 T1 加权像中 Group A 大于 Group B 的差异脑区。[-1 1] 效应与之相反。

完成上述操作后, 会生成 spmT\_\* 打头的文件 (不同文件对应于不同对比效应)。

#### 3.5 报告的生成

具体操作如下: 在 Xjview 中选 spmT\_0001,

设置对比结果的精确度为 0.01, cluster size (体素差异阈值) 为 100。选择对应的激活效应, 点击 report 生成报告 (包括具体差异脑区总体素的个数、MNI 坐标、具体脑区名称等)。

图 1 为同时显示 ADHD 患者组大于和小于正常对照组的差异脑区。

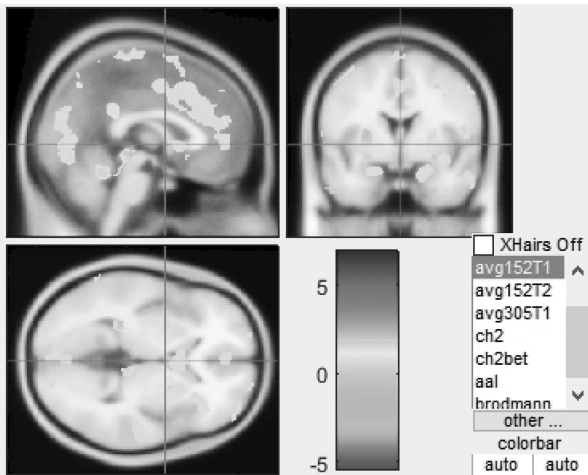


图 1 脑区对比结果

Fig. 1 Brain region comparison results

表 3 ADHD 患者组小于正常对照组的脑区

Table 3 Brain area of ADHD patient group smaller than the normal control group

MNI 坐标			脑 区	brodmann area/ 具体位置	T 值	number of voxels
X	Y	Z				
19.5	-4.5	-22.5	右侧边缘叶海马旁回	Amygdala	-3.668	131
-3	-84	-7.5	左侧枕叶舌回	BA18	-4.705	234
42	58.5	9	右侧额叶额中回	BA10	-3.244	121
7.5	-82.5	30	右侧枕叶楔叶	BA19	-4.258	117
-3	-3	48	左侧边缘叶扣带回	BA24	-3.386	119
0	-31.5	75	左侧额叶中央旁小叶	BA6	-4.600	210

ADHD 有很大的概率 (约 30%~60%)<sup>[7]</sup> 持续到患者的成年期, 对罹患 ADHD 的家庭以及社会具有十分广泛的影响。实验中通过进行病人与对照组的 T1 加权像对比发现, ADHD 患者成年个体中仍存在脑结构的差异。

研究中发现的差异脑区包括: 右侧边缘叶海马旁回、左侧枕叶舌回、右侧额叶、右侧枕叶/楔叶、左侧边缘叶扣带回、左侧额叶/中央旁小叶、左侧丘脑部。其中左侧丘脑部为 ADHD 患者组大于正常对照组脑区, 其余均为小于正常对照组的脑区。另外报告中发现除灰质外, 部分脑区白质也存在差异。这可能与 ADHD 成年个体的病情有一定的联系。

## 4 已有研究及结果讨论

既往研究表示 ADHD 患者有脑区体积减小现象, 对于儿童时期的脑区研究发现差异脑区主要集中在额叶、颞叶、顶叶、楔叶、丘脑、枕叶、扣带回、舌

图 1 中, 依次展示的为颅脑核磁共振分析结果的矢状位图 (左上)、冠状位图 (右上)、横断位图 (左下) 的差异脑区结果。右下的彩色条带, 为对应选取的差异衡量标尺 (一般选取 Xjview 软件的默认标尺即可), 标尺以 0 为界 (表示两组对照没有差异), 正值区间对应实验中组 A 大于组 B 的脑区标色区间、负值区间对应组 A 小于组 B 的脑区标色区间 (标色与 0 的距离越远表示差异程度越大)。剖面图中橙色对应 only+ 效应脑区, 青色对应 only- 效应脑区。

### 3.6 结果与分析

灰质 Group A 大于 Group B (only+) 效应结果如表 2 所示。

表 2 ADHD 患者组大于正常对照组的脑区

Table 2 Brain area of ADHD patient group larger than the normal control group

MNI 坐标			脑 区	brodmann area/ 具体位置	T 值	number of voxels
X	Y	Z				
-19.5	-33	12	左侧丘脑	Pulvinar	3.761	159

灰质 Group A 小于 Group B (only-) 效应结果见表 3。

回等部位<sup>[4]</sup>。W. Dillo 等<sup>[4]</sup>认为, ADHD 患者的舌回结构和功能存在显著的异常。随着患儿的生长发育与该病的行为紊乱相关的脑区可能出现一定的变化, 以药物辅助治疗可在一定程度上改善这些异常<sup>[15]</sup>。S. Durston 等<sup>[16]</sup>表示, ADHD 患儿左枕叶的灰质、白质较正常对照减少约 9%。由于大脑作为一个整体网络才能发挥其正常功能<sup>[1]</sup>, 因此大脑白质纤维传导束, 也起着十分重要的作用。所以白质的减少不可避免地会对患者的脑部功能造成影响。另外, 有研究多次发现枕叶中部皮层在 ADHD 中存在异常, 但研究人员并不认为枕叶皮层异常与 ADHD 相关<sup>[17]</sup>, 因此在 ADHD 的研究中应进一步增加对枕叶的探索。

研究中男女比例适中, 约为 1:1。研究对象集中于 20~40 岁人群, 其中灰质差异脑区符合以往的研究结果。ADHD 组左丘脑部灰质大于正常组, E. R. Sowell 等也曾发现部分脑区灰质体积增加<sup>[17]</sup>。以往研究结果表明儿童时期存在白质差异脑区, 研究中

也发现相似结论。研究中灰质、白质差异脑区的存在说明儿童时期的病症可能影响其成年期的脑组态,因此通过对患者相关差异脑区进行早期的干预有望成为一种新的治疗方案。

#### 参考文献:

- [1] 王韶怡, 李淑宇. 基于磁共振成像的 ADHD 脑沟形态学研究 [J]. 北京生物医学工程, 2016, 35(3): 221-225, 266.  
WANG Shaoyi, LI Shuyu. Study on Sulcal Morphology of ADHD Patients Based on MRI[J]. Beijing Biomedical Engineering, 2016, 35(3): 221-225, 266.
- [2] 张微, 刘翔平, 顾群, 等. 六城市 ADHD 流行病学调查 [J]. 中国临床心理学杂志, 2007, 15(1): 23-25.  
ZHANG Wei, LIU Xiangping, GU Qun, et al. An Epidemiological Investigation of ADHD in Six Cities[J]. Chinese Journal of Clinical Psychology, 2007, 15(1): 23-25.
- [3] 谢娜, 孙龙伟, 徐守军, 等. 注意缺陷多动障碍患儿脑结构和功能磁共振成像研究 [J]. 磁共振成像, 2016, 7(8): 582-586.  
XIE Na, SUN Longwei, XU Shoujun, et al. A Study of Brain Structural and Functional Magnetic Resonance Imaging in Children with Attention Deficit Hyperactivity Disorder[J]. Chinese Journal of Magnetic Resonance Imaging, 2016, 7(8): 582-586.
- [4] 司飞飞, 孙黎, 安莉, 等. 注意缺陷多动障碍及共患学习困难儿童大脑灰质、白质和全脑体积磁共振成像研究 [J]. 中国心理卫生杂志, 2016, 30(3): 179-184.  
SI Feifei, SUN Li, AN Li, et al. Magnetic Resonance Imaging Study on Gray Matter, White Matter and Total Brain Volumes in Children with Attention-deficit/Hyperactivity Disorder and Ones with Learning Disability[J]. Chinese Mental Health Journal, 2016, 30(3): 179-184.
- [5] 冀鑫如. 基于静息状态 fMRI 的 ADHD 复杂脑网络分析 [D]. 北京: 北京交通大学, 2015.  
JI Xinru. Analysis of ADHD Complex Brain Network Based on Rest State fMRI[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2015.
- [6] 阎浩, 黄悦勤, 刘肇瑞, 等. 广泛性焦虑障碍和强迫障碍的基于体素的大脑灰质体积研究 [J]. 中国心理卫生杂志, 2015, 29(3): 217-225.  
YAN Hao, HUANG Yueqin, LIU Zhaorui, et al. Different Traits of Gray Matter Volume in General Anxiety Disorder and Obsessive Compulsive Disorder: A Voxel-Based Morphometric Study[J]. Chinese Mental Health Journal, 2015, 29(3): 217-225.
- [7] 胡贤. 注意缺陷多动障碍的脑影像学 [D]. 沈阳: 中国医科大学, 2010.  
HU Xian. Deficits in Children with Attention Deficit Hyperactivity Disorder: Evidences from MRI Studies[D]. Shenyang: China Medical University, 2010.
- [8] 王金芳, 张玉梅. 基于体素的形态学分析在认知障碍领域的应用 [J]. 神经损伤与功能重建, 2016, 11(1): 56-59.  
WANG Jinfang, ZHANG Yumei. Voxel-Based Morphological Analysis in the Field of Cognitive Impairment[J]. Neural Injury and Functional Reconstruction, 2016, 11(1): 56-59.
- [9] 周珂, 蔡洁, 熊刚强. VBM-DARTEL 方法在阿尔茨海默症 MRI 图像分析中的应用 [J]. 计算机应用与软件, 2014, 31(3): 187-190.  
ZHOU Ke, CAI Jie, XIONG Gangqiang. VBM-Dartel Method Applied in Alzheimer's Disease MRI Image Analysis[J]. Computer Applications and Software, 2014, 31(3): 187-190.
- [10] 郭小娟, 姚力, 金真. 基于像素的形态测量学方法及其在脑图像处理中的应用 [J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2006, 42(2): 213-216.  
GUO Xiaojuan, YAO Li, JIN Zhen. A Method of Voxel-Based Morphometry and Its Applications to Brain Image Processing[J]. Journal of Beijing Normal University(Natural Science), 2006, 42(2): 213-216.
- [11] 郭黎, 史长征, 胡艳, 等. 帕金森病患者脑灰质变化的 VBM-MRI 研究 [J]. 中国神经精神疾病杂志, 2012, 38(6): 334-338.  
GUO Li, SHI Changzheng, HU Yan, et al. Voxel-Based Morphometry MRI Study of Gray Matter Change in Patients with Parkinson's Disease[J]. Chinese Journal of Nervous and Mental Diseases, 2012, 38(6): 334-338.
- [12] 聂坤. 联合应用 VBM 和 DTI 磁共振图像处理技术对帕金森病轻度认知障碍患者脑结构及白质纤维改变的研究 [D]. 广州: 南方医科大学, 2013.  
NIE Kun. Changes of Structural Brain and White Matter Fiber in Parkinson's Disease Patients with Mild Cognitive Impairment: Combined Evaluation by VBM and DTI Magnetic Resonance Imaging Analysis[D]. Guangzhou: Southern Medical University, 2013.
- [13] 马超琼. 结合基于体素的形态学分析和静息态 fMRI 对抑郁症的研究 [D]. 成都: 电子科技大学, 2013.  
MA Chaoqiong. A Voxel-Based Morphometry and Resting-State fMRI Study on Patients with Major Depression[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2013.
- [14] DILLO W, PROX-VAGEDES V, SZYCIK G R, et al. Neuronal Correlates of ADHD in Adults with Evidence for Compensation Strategies: A Functional MRI Study with a Go/No-Go Paradigm[J]. German Medical Science, 2010, 8: Doc09. (下转第 76 页)

- 201.
- [11] 刘庆雄. 基于数据驱动的垃圾邮件检测技术研究 [D]. 南昌: 华东交通大学, 2016.  
LIU Qingxiong. The Detection Method of SPAM Based on Data Driven[D]. Nanchang: East China Jiaotong University, 2016.
- [12] 宋洪正. 基于用户行为关系和内容的邮件分类算法的研究与实现 [D]. 成都: 电子科技大学, 2016.  
SONG Hongzheng. Research and Implementation of Classification Algorithm Based on Message Content and User Behavior Relationship[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2016.
- [13] 蒋亚平, 田月霞, 梅 骁. 基于免疫 Agent 的垃圾邮件过滤模型 [J]. 计算机应用与软件, 2016, 33(3): 294-298, 313.  
JIANG Yaping, TIAN Yuexia, MEI Xiao. A Spam Filtering Model Based on Immune-Agent[J]. Computer Applications and Software, 2016, 33(3): 294-298, 313.
- [14] RUSLAND N F, WAHID N, KASIM S, et al. Analysis of Naive Bayes Algorithm for Email Spam Filtering Across Multiple Datasets[J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2017, 226: 012091.
- [15] PAUL A, MUKHERJEE D P, DAS P, et al. Improved Random Forest for Classification[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2018, 27(8): 4012-4024.
- [16] TSAGKRASOULIS D, MONTANA G. Random Forest Regression for Manifold-Valued Responses[J]. Pattern Recognition Letters, 2018, 101: 6-13.
- [17] LIU M, LI Z R, ZHANG H T, et al. Feature Selection Algorithm Application in Near-Infrared Spectroscopy Classification Based on Binary Search Combined with Random Forest Pruning[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2017, 54(10): 103001.
- [18] CAO W H, XU J P, LIU Z T. Speaker-Independent Speech Emotion Recognition Based on Random Forest Feature Selection Algorithm[C]//2017 36th Chinese Control Conference (CCC). Dalian: IEEE, 2017: 1072-1075.
- [19] KOPRINSKA I, POON J, CLARK J, et al. Learning to Classify E-Mail[J]. Information Sciences, 2007, 177(10): 2167-2187.
- [20] HU Y, GUO C, NGAI E W T, et al. A Scalable Intelligent Non-Content-Based Spam-Filtering Framework[J]. Expert Systems with Applications, 2010, 37(12): 8557-8565.

(责任编辑: 申 剑)

(上接第 69 页)

- [15] 汤亚南, 魏 玲. 注意力缺陷多动障碍儿童脑部核磁共振成像技术应用进展 [J]. 临床儿科杂志, 2013, 31(3): 277-279, 282.  
TANG Yanan, WEI Ling. The Progress in Magnetic Resonance Imaging of the Brain in Children with ADHD[J]. Journal of Clinical Pediatrics, 2013, 31(3): 277-279, 282.
- [16] DURSTON S. A Review of the Biological Bases of ADHD: What Have we Learned from Imaging Studies?[J]. Mental Retardation and Developmental Disabilities Research Reviews, 2003, 9(3): 184-195.
- [17] 王 剑. 注意缺陷 / 多动障碍儿童灰质体积的形态学研究及 3D-ASL 在 ADHD 的初步应用 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2016.  
WANG Jian. A Voxel Based Morphometry MRI Study of Altered Gray Matter Volume and the Preliminary Application of 3D-ASL in Attention Deficit Hyperactivity Disorder Children[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2016.

(责任编辑: 申 剑)