

Research Status and Prospect of Automated Fossil Identification Technology*

Jing Xia, Zhiqiang Bai, Baopeng Wang, Yichao Wu, Jieqiong Chang

School of Earth and Space Sciences, Peking University, Beijing
Email: zqbai@pku.edu.cn, xj-402@163.com

Received: Mar. 27th, 2013; revised: Apr. 12th, 2013; accepted: Apr. 21st, 2013

Copyright © 2013 Jing Xia et al. This is an open access article distributed under the Creative Commons Attribution License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Abstract: The traditional identification method of fossils has always been tedious, inefficient, time-consuming and laborious. It cannot satisfy the needs of fast and further development of paleontological studies already. At present, there are three kinds of automation technologies used to identify fossils including expert system, multivariate statistical analysis and artificial neural network. With recent advancements in digital cameras and computer vision, multivariate statistical analysis and artificial neural network have become more and more popular and important. The combination of them will be an inevitable trend in the field of automated fossil identification systems in the future.

Keywords: Fossil; Automated Identification; Expert System; Multivariate Statistical Analysis; Artificial Neural Network

化石自动鉴定技术研究现状与展望*

夏 菁, 白志强, 王宝鹏, 吴一起, 常洁琼

北京大学地球与空间科学学院, 北京
Email: zqbai@pku.edu.cn, xj-402@163.com

收稿日期: 2013年3月27日; 修回日期: 2013年4月12日; 录用日期: 2013年4月21日

摘 要: 随着古生物学研究的深入与快速发展, 传统化石鉴定方法效率低下、费时费力, 已不能满足人们的需要。目前采用的化石自动鉴定技术主要有专家系统、多元统计分析和人工神经网络。近年来, 随着计算机技术的发展, 多元统计分析和人工神经网络已渐渐成为主流。二者的结合将是未来化石自动鉴定系统研发的必然趋势。

关键词: 化石; 自动鉴定; 专家系统; 多元统计分析; 人工神经网络

1. 引言

化石鉴定是一切古生物研究工作的基础。只有根据正确的化石鉴定结果获得的研究结论才具有实际意义和科研价值, 才能有效服务于地球科学与生物科学的深入研究。目前化石鉴定的主要方法是专家通过

观察标本的外部形态和内部结构, 查找文献、工具书、化石图册等相关研究资料, 比照图版并结合自身经验, 鉴定化石的属种。但随着古生物学研究的深入与快速发展, 化石鉴定工作中一些不容忽视的问题便日渐凸显:

1) 鉴定参考资料增多, 查询工作繁重。近三十年来我国古生物研究进步显著, 取得举世瞩目的成绩^[1,2], 同时也积累了大量的研究资料。参考资料的庞杂

*国家自然科学基金项目(41172031)和中国地质调查局地质调查项目(1212011085148, 1212011120116)资助。

使得标本鉴定过程中的文献查询、图版比对工作变得琐碎而繁重，难度增大。

2) 具备古生物分类知识的专业人才不足。与我国古生物研究发展趋势相反的是，古生物专业研究队伍并没有相应发展与壮大，市场经济的冲击造成生源减少，后备人才储备不足，学科存在新老人才断层现象^[3-6]。

3) 效率低下，费时费力。人工鉴定方法工作效率低，且难以大幅度提高，花费了专家们大部分时间与精力。若这些时间与精力被用于更高层次的研究，必定能取得更有价值的科研成果。

4) 鉴定过程受专家主导，鉴定结果具有主观性。化石鉴定工作中主观误判不可避免，相同标本不同专家鉴定可能得出不同的结论。专家鉴定结果不一致的原因有：受自身经验和知识所限，主观臆断造成误判^[7-9]；受到外来倾向性观点的干扰造成误判^[10]；标本存在个体差异，对同类标本的观察不足造成误判。

5) 现有化石鉴定方法与结果保存方式，不利于信息交流和共享。传统的纸质化石研究成果，发布渠道单一而滞后，不利于研究人员及时进行交流，也不利于研究成果的社会化普及和共享。

2. 化石自动鉴定研究现状

这些问题的产生促使古生物学者们寻求化石鉴定的新技术和新方法，利用计算机对化石进行自动鉴定便成为专家们的首选技术。化石自动鉴定系统不仅操作简便、工作效率高、结果相对客观，而且能够利用网络实现信息的交流和共享。针对化石保存方式与研究方法的特点，古生物化石自动鉴定系统采用化石数字图像作为数据源。基于图像的自动鉴定系统所提取的特征数据主要来自化石图像形态特征和灰度分布的统计特征^[11]。现有化石自动鉴定系统所采用的技术主要有以下三种：以推理为主的专家系统、多元统计分析分析和人工神经网络。

2.1. 以推理为主的专家系统

专家系统(Expert System)是一种智能的计算机程序，具备某个应用领域的专家级知识和经验，它能运用知识和推理过程，模拟专家的思维做出决策，从而解决只有专家才能解决的问题^[12]。继 1965 年第一个

专家系统 DENDRAL 研制成功后，多个行业的专家系统相继被研发。20 世纪 80 年代，专家系统的研发和使用已深入到各个专业领域。80 年代末期，国外的古生物学者们就开始尝试开发化石鉴定专家系统，如 Brough 和 Alexander^[13]，Riedel 等^[14]。以 Swaby 开发的 VIDES (the Visual Identification Expert System) 系统为代表^[15-17]，系统向用户提供一系列特征属性的选项，用户观察标本并选择相应的特征属性，系统接受反馈后根据预先定义的规则对标本进行判断。后期专家系统的开发则逐渐转变为以知识为主。Thonnat 等^[18-20]建立了一个基于知识的专家系统原型，研究利用计算机视觉技术进行有孔虫自动鉴定方法的可行性。

国内古生物学者对于专家系统的研发也做了大量工作。徐涵秋^[21,22]研制了古生物化石微机鉴定系统，将蜓类化石的形态构造特征转换成数据代码，用户通过输入特征代码，与数据库内的代码对比，获得鉴定结果；王益锋等^[23]首次提出在古生物化石归类中应用人工智能原理，借助计算机的自动推理功能，利用谓词公式判断归类；郝诒纯等^[24]建立了微体古生物微型计算机辅助研究系统，用户可以通过系统多级“菜单”的引导，对数据库储存的化石属种特征进行检索，辅助化石属种鉴定；陈民敏、宋之琛等^[25,26]对孢粉的基本形态特征进行编码，开发了化石(孢粉)识别专家系统，系统地根据“模板匹配”原理将化石特征编码与模板化石对比，计算其相似程度，从而鉴定化石属种；曾勇等^[27]通过人机对话，将获取到的专家知识用以建立化石分类的决策树，根据决策树建立规则库，从而为建立化石鉴定专家系统打下基础。值得注意的是，张松梅等^[28]基于 GIS 技术建立了四射珊瑚分类信息系统，虽然系统仍以推理规则为主，通过人机对话的方式进行鉴定，但是借助 GIS 技术，系统能够提供化石的地史和地理分布信息，具有空间分析功能。

早期的专家系统以推理算法为主，推理规则主要来源于专家经验的形式化描述，较为固定和简化，易于用户理解和使用。系统将微体古生物学家使用的鉴定规则引入到计算机辅助鉴定过程中，用户根据系统提示观察标本特征，进行判断并反馈给系统获得结果。此类专家系统更像一个电子版的化石分类特征检索表，鉴定全过程中需要人为干预，没有使计算机发挥自学习能力，没有实现自动鉴定功能。

2.2. 多元统计分析

多元统计分析(multivariate statistical analysis)是指将分析对象的定性特征转化为定量特征,运用多元统计方法对数据进行整理归类及解释的研究方法。化石自动鉴定中常用的多元统计分析有因子分析、主成分分析、聚类分析和判别分析等。国外的古生物学者很早便开始使用多元统计方法分析化石形状并加以分类,如 Belyea 和 Thunell^[29], Healy-Williams^[30,31]等使用傅立叶形状分析和边缘检测算法分析有孔虫轮廓形状,研究物种个体系统发育和古海洋环境变化。

Burke 等^[32]对化石图像的轮廓进行傅立叶形状分析,使用 SPSS 统计软件对傅立叶级数进行主成分分析,构造判别函数,从而首次实现介形类化石的自动鉴定;Ranaweera 等^[33]提出了一个有孔虫半自动鉴定方法:系统将图像映射到统一的空间进行标准化,计算不同图像间的相关系数,使用极大团算法进行分类,为每一类建立一个模板,再由专家鉴定模板给出结果,实验证明,该方法性能稳定,降低了 35% 的鉴定工作量;Charles^[34]选择 logistic 分析、支持向量机(SVM)、决策树、最近邻居法和朴素贝叶斯算法等十个最常用的分类器用于自动识别图像中的单一完整孢粉粒子,通过实验证明:logistic 分析简单易行,分类精度高,AUC(ROC 曲线下面积指数)高,识别效果较好。

国内学者也很早就开始了将多元统计分析用于化石自动鉴定的研究工作。李酉兴^[35,36]将华南弓石燕和华南竹节石的部分形态特征转换为数字,选取特定的特征数据计算欧氏距离和相似性系数,通过聚类分析对化石进行分类,并设计了半自动化鉴定化石的计算机程序;徐涵秋等^[37,38]改进了原古生物化石微机鉴定系统,按照化石不同形态特征的重要性分别赋予权重,引入模糊数学,通过计算化石特征数据代码的相似度而非简单地进行对比,给出化石鉴定结果;严幼因,张松林等^[39,40]建立了床板珊瑚形珊瑚自动鉴定和数据库管理微机处理系统,在属以上级别鉴定中,系统根据用户输入的特征代码,计算归属度,列出可能的鉴定结果,在种级别的鉴定中,采用加权明氏距离计算相似性系数,利用 Q 型聚类分析将标本鉴定到种。

此类技术对化石图像特征数据进行多元统计分

析,带有无监督学习的特点。该方法简单易行,不需要测试集中属种的预定义知识,训练和测试速度快,分类精度高。但此类技术不具有通用性,每种算法只能针对单一物种鉴定,当面对多物种鉴定时,需要将多个算法相结合,导致方法的复杂度大大提升,适应性和灵活性降低。

2.3. 人工神经网络

人工神经网络(Artificial Neural Networks, 简称为 ANN)也简称为神经网络(NN),是指由大量与生物神经细胞类似的处理单元联结而成的网络,是利用计算机技术模拟人脑结构特征和功能特征的一类人工系统^[41]。目前,国外古生物学者大多使用此类技术开发化石自动鉴定系统,典型的例子是 SYRACO 和 COGNIS。Dollfus 和 Beaufort 等^[42,43]采用多层并行神经网络开发了颗石藻自动鉴定系统 SYRACO,几乎可以鉴定视野中的所有颗石藻个体,准确率高达 96%。然而,SYRACO 的神经网络使用了至少 80 万个参数,根据神经网络的理论^[44],要成功训练这样一个网络需要至少 80 万副图像,但是开发者的训练集数量远远小于这个数字,他们也无法充分解释系统仍然性能良好的原因。Bollmann 等^[45,46]使用卷积人工神经网络开发了超微化石鉴定系统 COGNIS。系统连接电子显微镜鉴定多物种时,取得了良好的效果;但连接光学显微镜鉴定单一物种时,效果并不理想,系统的敏感性较高,但假阳性也高。开发者认为需要进一步研究以确定 COGNIS 是否可以配合光学显微镜产生较好的效果。使用并行神经网络有可能使系统从鉴定单一物种扩展到多物种。

France 等^[47,48]设计了一个基于灵活神经网络的花粉化石自动鉴定系统。每个神经网络针对单独的已知属种进行训练,所有训练后的神经网络结合形成一个新的分类器,可以鉴定所有属种。虽然该系统鉴定效果较好,但可鉴定的属种数量太少,不足以广泛应用。MacLeod 等^[49]认为使用传统统计方法鉴定化石是不可行的。他们以现生物种鉴定软件 DAISY^[50]的成功运用为例,说明人工神经网络在物种鉴定方面的优势,提出在 DAISY 的基础上建立古生物自动鉴定软件 PaleoDAISY。他们使用线性判别分析(LDA)和人工神经网络对哺乳动物桡骨头化石图像进行分类,比较两

种方法的鉴定性能^[51]。实验证明, ANN 的效果优于 LDA。Weller 等^[52,53]使用形态描述子、傅立叶描述子和纹理描述子提取和选择孢粉图像的特征参数, 利用人工神经网络鉴定孢粉化石。该系统目前还只是在实验阶段, 并没有被真正投入使用。

我国古生物学者利用人工神经网络鉴定化石的研究工作则开展的较少。林文等^[54]尝试使用改进的 Hopfield 人工神经网络模型识别介形类化石; 黄铮, 白志强等^[55]针对牙形石部分鉴定特征难以量化描述的不足, 提出利用非线性方程对特征进行定量描述, 并尝试利用反向传播人工神经网络进行分类, 该方法取得了较好的效果, 为牙形石自动鉴定研究奠定了基础。

人工神经网络具有自学习和自适应的能力, 使用越多, 精度越高。它们不要求对事物的机制有明确的了解, 结果取决于网络输入和输出之间的连接参数, 而这些参数是根据预先训练自动获得的, 这种方式对解决机理尚不明确的问题特别有效。一般来说, 人工神经网络的学习能力比传统的统计方法要强, 但这种方法也具有监督学习的缺点: 无法控制和精确分析神经网络的各项性能参数; 针对新加入的鉴定属种, 要重新选择训练集, 训练神经网络, 导致训练量可能会大幅度增加; 分类精度受限于训练集的大小, 若训练集数目过小, 系统的实际性能则难以保证。

2.4. 化石自动鉴定技术总结

早期的专家鉴定系统以符号逻辑推理为主, 推理规则简单而固定, 系统的自学习能力和更新能力差, 固定的推理机制无法适应新的属种鉴定要求。通过人机交互, 基于规则推理的鉴定方法不仅没有实现化石鉴定的自动化, 而且要求使用者必须具备专业知识, 才能做出属于学科领域的回答。这些问题限制了专家鉴定系统的使用, 该技术无法满足实际应用需求, 因此在化石鉴定领域没有被深入应用。

随着计算机技术的进步, 后期发展起来的化石自动鉴定系统大多采用多元统计分析和人工神经网络。统计方法发展得比较早, 理论相对成熟, 特征提取与选择是设计者安排好的, 因而针对明确的单一物种鉴定时, 简单易行, 准确度高, 但面对多物种鉴定时, 多个统计算法的叠加效果往往较差。人工神经网络通过调整内部大量处理单元之间相互连接的关系, 模拟

人脑处理信息的功能, 与传统的统计模型相比, 人工神经网络更加灵活, 运行速度快、学习能力强、可扩展性强^[51,53], 更适合先验分布不明确的非线性问题, 所以更加适合复杂的多物种鉴定。但是, 训练一个能够用于多物种分类的神经网络所需要采集的数据量和工作量是巨大而又无法人为控制的, 由于化石的采集与保存方式, 训练集样本数目往往有限, 不一定能达到标准。

3. 我们的期望和工作

综上所述, 目前主流的多元统计分析和人工神经网络技术各有优劣, 二者的结合将是未来化石自动鉴定的主要趋势。我们希望能够结合二者的优点设计一个化石自动鉴定系统, 弥补各自的不足。我们以牙形石作为研究对象, 通过标本拍摄、图像下载和文献扫描等方式, 收集到 2000 多张牙形石数字图像。通过对大量不同属种牙形石图像的对比研究, 我们确定了“多元统计分析粗分类, 人工神经网络细分类”的技术思路。针对易于保存且鉴定标准明确的形态特征, 采用多元统计分析方法进行分类; 而对于部分模糊的定性特征, 则使用人工神经网络的方法进行分类。

我们已经设计了一个牙形石轮廓分类算法^[56]。该算法提取牙形石图像的中心骨架特征和周长、面积、离心率、矩形度、圆形度、实体性等区域特征, 使用判别分析判断牙形石属于单锥型、复合型或是台型。实验证明, 该算法能有效识别牙形石轮廓。我们下一步的工作重点是利用人工神经网络实现更加细致的分类。我们希望通过研发牙形石自动鉴定系统为专家们提供一个研究辅助工具, 使他们从繁琐的日常鉴定工作中解放出来, 将更多的时间与精力用于更深层次的科研工作, 取得更好的研究成果; 希望我们的工作能够为其他门类化石的自动鉴定研究提供经验, 启发思路; 希望借助化石自动鉴定系统的开发为古生物定量研究工作的深入开展做出贡献。

参考文献 (References)

- [1] 刘羽. 美国国家科学基金会 2000~2010 年古生物发展战略及其启示及我国古生物学发展的若干思考[J]. 中国科学基金, 2005, 19(6): 347-351.
- [2] 编辑部. 英国《皇家学会会志 B 辑》出版中国古生物学专辑[J]. 古脊椎动物学报, 2010, 48(1): 84.
- [3] 殷鸿福. 古生物学向何处去[J]. 中国地质教育, 1994, 3: 48-

- 49.
- [4] 王训练, 徐均涛. 古生物学研究的新成果——中国古生物志与中国各门类化石编研[J]. 中国基础科学, 2002, 5: 16-21.
- [5] 沙金庚. 国家自然科学基金对古生物学人才培养的促进作用[J]. 中国科学基金, 2006, 20(6): 342-344.
- [6] 刘家润, 施贵军, 顾元达等. 校所合作办学: 培养古生物学专业本科生的探索与实践[J]. 中国地质教育, 2007, 4: 143-145.
- [7] 王成源. 微体化石研究中应注意的问题[J]. 地质论评, 1993, 39(6): 515-522.
- [8] 陈孟莪. 对“清河镇动物群”和“昌图动物群”的质疑[J]. 地质科学, 1993, 28(2): 199-200.
- [9] 张允平. 清河镇动物群化石之否定[J]. 地质科学, 1994, 29(2): 175-186.
- [10] 廖卓庭. 一则更正和由此引发的思考[J]. 安徽地质, 2000, 10(1): 78-80.
- [11] J. Garratt, A. Swan. Morphological data from coccolith images. In B. Hamrsmid, J. R. Young (Eds). *Nannoplankton Research, Proceedings of the Fourth INA Conference*. Hodonin Prague, 1992: 11-34.
- [12] J. C. Giarratano, G. D. Riley 著, 印鉴, 陈忆群, 刘星成译. 专家系统原理与编程[M]. 北京: 机械工业出版社, 2006: 1-5.
- [13] D. R. Brough, I. F. Alexander. The fossil expert system. *Expert Systems*, 1986, 3(2): 76-83.
- [14] W. R. Riedel. Identify: A prolog program to help identify fossils. *Computers & Geosciences*, 1989, 15(5): 809-823.
- [15] P. A. Swaby. Integrating artificial intelligence and graphics in a tool for microfossil identification for use in the petroleum industry. *Proceedings of the 2nd Annual Conference on Innovative Applications of Artificial Intelligence*. Washington, 1990: 203-218.
- [16] P. A. Swaby. Vides: An expert system for visually identifying microfossils. *IEEE Expert*, 1992, 7(2): 36-42.
- [17] J. Athersuch, F. T. Banner, A. C. Higgins, et al. The application of expert systems to the identification and use of microfossils in the petroleum industry. *Mathematical Geology*, 1994, 26(4): 483-489.
- [18] M. Thonnat, M. Gandelin. An expert system for the automatic classification and description of zooplanktons from monocular images. *Proceedings of the 9th International Conference on Pattern Recognition*. Rome, 1988: 114-118.
- [19] S. Liu, M. Thonnat and M. Berthod. Automatic classification of planktonic foraminifera by a knowledge-based system. *Artificial Intelligence for Applications, Proceedings of the Tenth Conference*, 1994: 358-364.
- [20] S. Yu, P. Saint-Marc, M. Thonnat, et al. Feasibility study of automatic identification of planktic foraminifera by computer vision. *Journal of Foraminiferal*. 1996, 26(2): 113-123.
- [21] 徐涵秋. 古生物化石的自动化鉴定[J]. 地质论评, 1988, 34(6): 560-569.
- [22] 徐涵秋, 郭雯. 古生物化石微机鉴定的新进展[J]. 地质论评, 1990, 36(4): 370-376.
- [23] 王益锋, 张逸昆. 人工智能原理在古生物化石归类中的应用[J]. 古生物学报, 1988, 27(4): 521-525.
- [24] 郝诒纯, 万世基, 雷新华. 微体古生物微型计算机辅助研究系统[J]. 现代地质, 1989, 3(4): 369-376.
- [25] 陈民敏. 初探电子计算机在孢粉鉴定中的应用[J]. 石油实验地质, 1985, 7(4): 324-328.
- [26] 陈民敏, 宋之琛, 黄斌等. 化石(孢粉)识别专家系统[J]. 古生物学报, 1990, 29(1): 106-114.
- [27] 曾勇, 屈永华. 化石鉴定专家系统中具学习功能决策树的研究与实现[J]. 地质论评, 2000, 46(s1): 208-211.
- [28] 张松梅, 张庸. 基于 GIS 的四射珊瑚分类信息系统[J]. 世界地质, 1999, 18(1): 64-67.
- [29] P. R. Belyea, R. C. Thunell. Fourier shape analysis and planktonic foraminiferal evolution: The *Neoglobobulimina pullenitina* lineages. *Journal of Paleontology*, 1984, 58(4): 1026-1040.
- [30] N. Healy-Williams. Fourier shape analysis of *Globorotalia truncatulinoides* from Late Quaternary sediments in the southern Indian Ocean. *Marine Micropaleontology*, 1983, 8(1): 1-15.
- [31] N. Healy-Williams. Quantitative image analysis: Application to planktonic foraminiferal paleoecology and evolution. *Geobios Mémoire Spécial*, 1984, 17(s1): 425-432.
- [32] C. D. Burke, W. E. Full and R. E. Gernant. Recognition of fossil freshwater ostracodes—Fourier shape analysis. *Lethaia*, 1987, 20(4): 307-314.
- [33] K. Ranaweera, A. P. Harrison, S. Bains, et al. Feasibility of computer-aided identification of foraminiferal tests. *Marine Micropaleontology*, 2009, 72(1-2): 66-75.
- [34] J. Charles. Automatic recognition of complete palynomorphs in digital images. *Machine Vision and Applications*, 2011, 22(1): 53-60.
- [35] 李酉兴. 用电子计算机鉴定华南弓石燕和一些竹节石化石[J]. 中南大学学报(自然科学版), 1982, 34(4): 122-128.
- [36] 李酉兴. Z-80B1/2 机鉴定化石程序[J]. 桂林工学院学报, 1982, 2(4): 88-95.
- [37] 徐涵秋. 微型电子计算机在(竹蜓)类化石鉴定中的应用[J]. 微体古生物学报, 1987, 4(1): 103-110.
- [38] 徐涵秋. (竹蜓)类化石同物异名问题的微机定量研究——模糊数学在古生物化石研究中的应用[J]. 中国科学(B辑), 1991, 21(1): 90-101.
- [39] 严幼因, 池永一, 武耀诚. Favosites 属的 Q 型聚类分析[J]. 古生物学报, 1988, 27(4): 498-514.
- [40] 张松林, 严幼因. 床板珊瑚形珊瑚自动鉴定方法[J]. 古生物学报, 1995, 34(1): 119-128.
- [41] 马锐编著. 人工神经网络原理[M]. 北京: 机械工业出版社, 2010: 1-11.
- [42] D. Dollfus, L. Beaufort. Fat neural network for recognition of position-normalised objects. *Neural Networks*, 1999, 12(3): 553-560.
- [43] L. Beaufort, D. Dollfus. Automatic recognition of coccoliths by dynamical neural networks. *Marine Micropaleontology*, 2004, 51(1-2): 57-73.
- [44] L. Tarassenko. *Guide to neural computing applications*. New York: John Wiley & Sons, Incorporated, 1998: 5-95.
- [45] J. Bollmann, M. Y. Cortés, A. T. Haidar, et al. Techniques for quantitative analyses of calcareous marine phytoplankton. *Marine Micropaleontology*, 2002, 44(3): 163-185.
- [46] J. Bollmann, P. S. Quinn, M. Vela, et al. Automated particle analysis: calcareous microfossils. In P. Francus (Ed.). *Image analysis, sediments and paleoenvironments*. Dordrecht: Kluwer Academic Publisher, 2004: 229-252.
- [47] I. France, A. W. G. Duller, G. A. T. Duller, et al. A new approach to automated pollen analysis. *Quaternary Science Reviews*, 2000, 19(6): 537-546.
- [48] I. France, A. W. G. Duller and G. A. T. Duller. Software aspects of automated recognition of particles: The example of pollen. In P. Francus (Ed.). *Image analysis, sediments and paleoenvironments*. Dordrecht: Kluwer Academic Publisher, 2004: 253-272.
- [49] N. MacLeod, M. A. O'Neill and S. A. Walsh. PaleoDAISY: An integrated and adaptive system for the automated recognition of fossil species. *The Geological Society of America, Abstracts and Programs*, 2003, 35(6): 316.
- [50] M. Denos, M. O'Neill. *Tumbling Dice—Moving towards a better tomorrow* [URL], 2012. <http://www.tumblingdice.co.uk/daisy/>
- [51] N. MacLeod, M. A. O'Neill and S. A. Walsh. The automated recognition of vertebrate fossils: methods, applications, and implications. *Journal of Vertebrate Paleontology*, 2004, 24(3): 86A-87A.
- [52] A. F. Weller, A. J. Harris and J. A. Ware. Artificial neural networks as potential classification tools for dinoflagellate cyst images: A case using the self-organizing map clustering algorithm. *Review of Palaeobotany and Palynology*, 2006, 141(3-4): 287-302.
- [53] A. F. Weller, A. J. Harris and J. A. Ware. Two supervised neural networks for classification of sedimentary organic matter images

- from palynological preparations. *Mathematical Geology*, 2007, 39(7): 657-671.
- [54] 林文, 陈学佳. 用于介形类化石识别及岩芯分析的人工神经网络方法[J]. *中国科学技术大学学报*, 1992, 22(1): 95-99.
- [55] 黄铮, 白志强, 柴华. 利用人工神经网络方法对牙形石鉴定中若干“模糊特征”的数字化研究[J]. *地质科技情报*, 2009, 28(3): 94-98.
- [56] 夏菁. 基于数字图像中心骨架的牙形石自动识别研究[A]. *中国古生物学会第 26 届学术年会论文集*[C]. 2011: 271-272.