

# 基于插件技术的人工免疫智能空间优化平台研究\*

赵翔, 刘耀林, 刘殿锋

(武汉大学资源与环境科学学院, 湖北武汉 430079)

**摘要:**采用人工智能方法求解空间优化问题已成为当前地理学研究领域的热点之一。研究目的在于通过设计一个开放的、可扩展的人工免疫空间优化模型框架,开发基于插件技术的优化工具软件,丰富空间优化决策支持的方法和技术体系。研究从空间优化问题的基本特点和计算需求出发,定义了面向空间优化问题求解的克隆选择优化模型框架。在此基础上,采用“插件-宿主平台”结构设计了人工免疫智能空间优化平台的总体架构,定义免疫算子插件与空间优化问题应用插件开发机制。实验结果表明,平台的架构和功能设计充分考虑了计算平台的开放性和扩展性,通过平台标准接口的功能扩展可实现对不同空间优化问题的求解。空间优化问题研究者或政府决策部门无需关系人工免疫优化方法的具体内涵即可基于本平台完成其具体空间优化决策支持任务。

**关键词:**空间优化;人工免疫系统;克隆选择;插件技术

**中图分类号:**TP79 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-2486(2013)02-0164-05

## A study on artificial immune computing platform for spatial optimization based on plugin technique

ZHAO Xiang, LIU Yaolin, LIU Dianfeng

(School of Resource and Environment Science, Wuhan University, Wuhan 430079, China)

**Abstract:** Solving the spatial optimization problems can be a complex and difficult task, since it has to handle some high-dimension, non-linear, complicated relationships. Many efforts have been made with regard to this specific issue, and the strong ability of artificial immune system algorithms has been proven in previous studies. In this study, a novel framework used for spatial optimization based on clonal selection algorithms, which are the most popular immune algorithms in geoscience, is proposed. Then, the spatial optimization platform was designed based on the architecture of “plugins - platform”, and some key technologies about the developing of immune operator plugins and spatial optimization application plugins were described. Based on the standard APIs provided by this platform, researchers can develop their own problem-specific application plugins to solve the practical problems or to implement some advanced immune operators into the platform to improve the performance of the algorithm. Finally, the functionality, reusability and extensibility of platform were tested by using the Traveling Salesman Problem as a benchmark testing. Experiments show that, the platform is capable of solving various optimization problems, and it is expected to bridging the gap between the immune algorithm researchers, geographers and decision makers.

**Key words:** spatial optimization; artificial immune system; clonal selection; plug-in

空间优化问题是一类在地理学研究领域中广泛存在的复杂空间问题,其基本目的是采用一定的空间搜索方法获取在一定限制条件和特定目标(社会、经济、生态目标等)约束下的最优空间实体分布状态。空间优化问题已成为当前地理学研究领域的重要热点问题之一,现实中的许多问题,如设施选址<sup>[1-2]</sup>、路线优化<sup>[3-5]</sup>、资源环境监测网络优化<sup>[6-7]</sup>、土地资源优化配置<sup>[8-10]</sup>等被认为是经典的空间优化问题。空间优化问题通常涉及对非线性、多因素和多层次的复杂关系进行建模,传统的GIS所提供的空间分析功能已无法对这些复

杂关系进行建模、表达、推理和学习。

人工免疫系统(Artificial Immune System, AIS)作为一种新型智能仿生算法,由于其在解决高维、非线性问题上的优越性日益凸显,已广泛应用于空间优化问题求解。人工免疫系统是一类在计算机环境下对生物免疫系统的学习、记忆、识别等免疫原理进行模拟的智能仿生算法的总称,其中包括基于阴性选择原理的阴性选择算法(Negative Selection Algorithm, NSA)<sup>[11]</sup>、基于克隆选择原理的克隆选择算法(Clonal Selection Algorithm, CSA)<sup>[12]</sup>和基于免疫学习机理的免疫

\* 收稿日期:2012-09-01

基金项目:国家863高技术研究发展计划资助项目(2011AA120304);国家自然科学基金创新团队项目(41021061)

作者简介:赵翔(1985—),男,湖南新邵县人,博士研究生, E-mail:zhaoxiang@whu.edu.cn;

刘耀林(通信作者),男,教授,博士生导师, E-mail:yaolin610@163.com

网络模型(Artificial Immune Network)<sup>[13]</sup>等。相对于遗传算法、人工神经网络等智能算法,国内外有关人工免疫系统的研究起步相对较晚,但发展迅速。在空间优化相关研究领域,人工免疫算法已在空间数据挖掘<sup>[14]</sup>、路径优化<sup>[15]</sup>、设施布局<sup>[16]</sup>、土地利用<sup>[12,17]</sup>等方面取得了重要进展。其中,基于群体智能的克隆选择算法是目前在地理学相关领域中研究最多、应用最广的一种基于人工免疫原理的智能算法。

采用人工免疫方法求解空间优化问题通常需要针对特定问题设计抗体编码方式、亲和度函数和约束条件等内容,而不同类型空间优化问题的抗体编码、亲和度函数和约束条件通常存在较大差异,空间优化问题的上述特点为构建统一的智能优化平台提出了更高要求。因此,国内外有关学者大多倾向于从特定问题的建模与求解需求出发设计针对特定问题的免疫算法,而对于通用智能计算平台的研究较少<sup>[18]</sup>。近年来,中间件技术和基于插件的软件架构思想在诸多专业领域广泛应用并取得成功<sup>[19-22]</sup>,为构建统一的人工免疫智能空间优化平台提供了解决方案和借鉴经验。因此,研究试图从克隆选择算法的基本特点出发,结合地理空间优化复杂多变的实际需求,建立面向地理空间优化的免疫算法模型框架,设计免疫算子与空间优化问题应用插件开发机制,开发实现插件集成的宿主平台程序,为相关研究人员提供一个可扩展、可定制、通用的计算平台,进而为开展实践工作提供决策支持。

### 1 克隆选择优化模型框架

设计面向地理空间优化的克隆选择算法框架的目的在于提供一个开放式、可扩展的计算框架,为算法改进与空间优化问题扩展接口提供理论方法基础,关键步骤在于对空间优化问题建模与求解的基本特点和需求进行分析,得出其共性和特性。空间优化问题的共性在于其本质都是在一定条件约束和变量值域约束下,求得目标函数的最大值及相应的决策变量值的过程。空间优化问题的建模的特性则在于:(1)优化问题的表达。采用二进制、实数等编码方式通常不能充分表达空间优化问题中的空间实体的空间位置、拓扑关系等特定关系,必须针对特定问题设计特定的编码方式。(2)优化目标的制定。空间优化问题通常需要在一定应用情景的指导下,结合特定的社会经济环境设计优化目标和抗体亲和度评价函数。(3)优化问题的约束条件设计。空间优化问题的

建模与求解通常是在特定领域知识的约束下进行,除了处理一般的数学关系约束条件外,还需要处理空间问题特有的约束条件(空间拓扑关系约束等)。(4)算法的输入输出数据。不同空间优化问题在编码方式、亲和度函数、约束条件、抗体解码方式等方面的差异,必然导致了算法运行时的输入/输出数据在内容、结构和格式各不相同。

因此,采用免疫算法解决空间优化问题,必须针对特定问题设计特定的编码方式、目标函数、约束条件和输入输出数据内容,增大了通用计算平台的设计与开发的难度。算法框架设计的基本原则是将算法的一般性原理与空间优化问题的特殊性相分离,具体方法是:(1)免疫算子分解。将算法分解成若干个基本算子单元,为算法的改进与流程自定义提供基本依据;(2)免疫算子分类。抗体基因数据结构与优化问题编码方式密切相关,根据各算子操作的数据对象不同,将免疫算子分为操作抗体基因的算子和不操作抗体基因的算子两类。其中,操作抗体基因的算子需要根据特定的空间优化问题进行设计,后者则为一般性的通用算子。基于上述思路,设计面向地理空间优化的克隆选择算法模型框架见图 1。

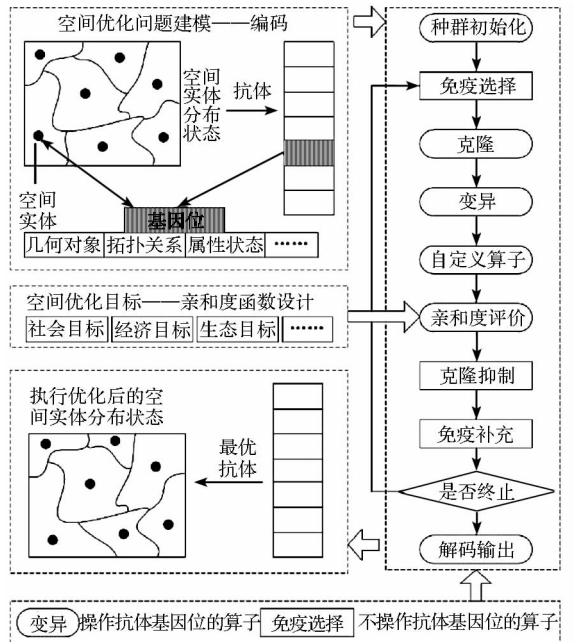


图 1 面向空间优化的克隆选择算法框架

Fig. 1 Framework of the clonal selection algorithm for spatial optimization

基本克隆选择算法主要包括种群初始化、免疫选择、克隆、变异、亲和度评价、克隆抑制、免疫补充和解码输出,共 8 种类型基本算子。其中,空间优化问题通过编码将问题的解(空间实体的分布状态)表述为具有特定数据结构的抗体,抗体

的每个基因对应着某个空间实体的状态。种群初始化、克隆、变异、交叉和某些自定义的算子在计算过程中涉及抗体基因操作,需要根据特定的空间优化问题设计。其余算子主要基于抗体的亲和度值等信息进行运算,具有一般性特征,可作为通用算子进行设计。

## 2 “平台-插件”设计的关键技术

由上述克隆选择优化模型框架设计结果可知:不同类型空间优化问题可通过定义具有通用接口的问题应用插件实现,免疫算法的改进与自定义也可通过开发相应的免疫算子插件完成。空

间优化问题的求解可通过统一的插件宿主程序对算子插件和问题应用插件的解析与动态调用实现。

### 2.1 平台宿主程序总体架构

平台宿主程序完成各免疫算子插件和问题应用插件的集成和动态调用,并向决策者与决策部门提供人机交互的集成平台。平台以开源 GIS 组件 DotSpatial 为基础平台,采用 C#4.0 作为开发语言实现相关的接口定义与功能开发,利用 .net 平台的程序集(Assembly)反射(Reflection)技术实现各算子插件与应用插件的识别和实例化(图 2)。

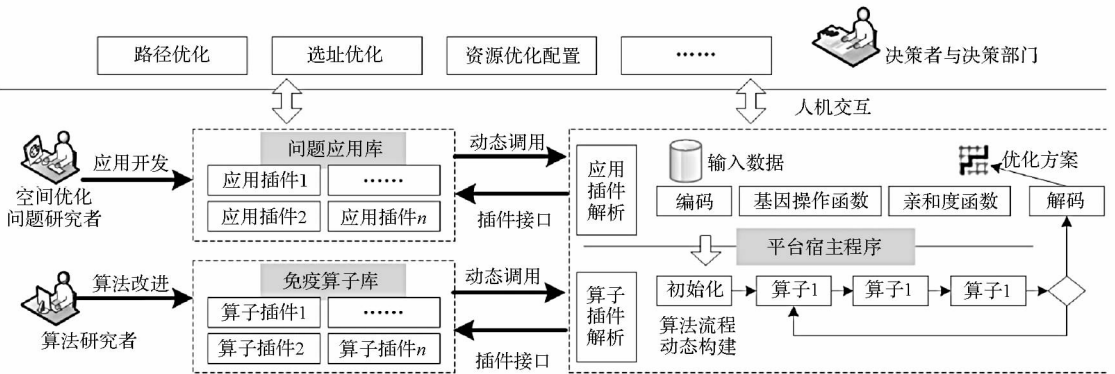


图 2 面向空间优化的智能计算平台总体架构

Fig. 2 Architecture of the intelligent computing platform for spatial optimization

### 2.2 免疫算子插件开发技术

免疫算子的开发可通过继承自 ICSOperator 接口完成(图 3),关键技术包括:(1)免疫算子开发者可在同一个动态库中封装多个算子类。平台运行时,通过 .net 的程序集反射机制动态识别出动态库中所有的算子类,并从中提取各算子类所包含的方法名称、方法描述信息、方法运行所必需的参数信息和算子类型(克隆算子、变异算子或自定义算子等)。其中,方法执行参数的类型(Type)、值(Value)、值域(Domain)和描述(Description)等信息通过一个 CSParameters 类型进行封装。(2)可在每个算子类中封装多个函数方法。例如,用户可在某个变异算子类中封装多个变异函数,以提供不同变异策略。用户在定义某个函数方法时,必须同时提供该函数执行所需的参数信息和方法描述信息。(3)需要操作抗体基因的算子类在运行时需指定其应用的空间优化问题。算子访问抗体基因的操作通过使用空间优化问题接口提供的标准函数实现。(4)算子操作的抗体种群和参数配置信息由宿主平台传递给算子类的方法调度核心。调度核心接收种群和参数

后,匹配用户指定的执行函数和对应的参数信息,执行计算任务,并将计算结果写入种群返回给平台宿主程序。

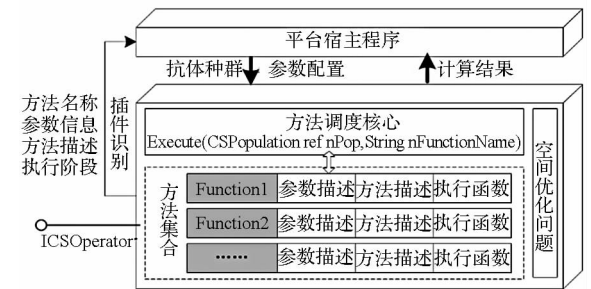


图 3 免疫算子插件模型

Fig. 3 The plug-in model for immune operators

### 2.3 问题应用插件开发技术

对于任意空间优化问题求解,用户可通过继承抗体基类 CSAntibody 和优化问题定义接口 ICSOptimizationProblem 将问题的编码方案、亲和度函数、约束条件和输入输出数据等集成到应用插件(图 4)。

ICSOptimizationProblem 接口由用户交互接口和标准函数接口两部分内容组成。用户交互接口

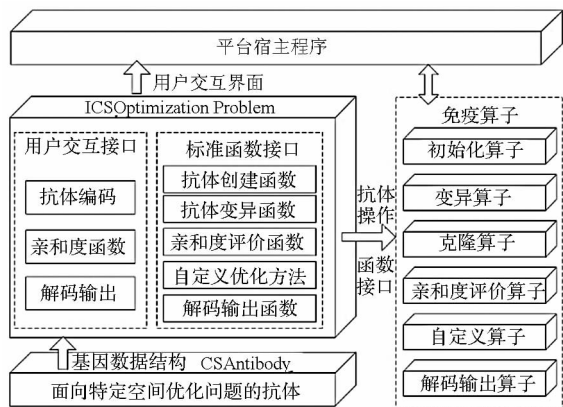


图 4 空间优化问题应用插件模型

Fig. 4 The plug-in model for spatial optimization problems

用于向宿主平台提供编码配置、亲和度函数配置和输入输出配置的人机交互界面。用户在开发面向特定优化问题的应用插件时需要继承上述接口,并根据优化问题设计界面。运行时,平台从应用插件中动态调用相关用户界面以供用户配置。函数接口部分向相关的免疫算子提供 5 个标准函数,分别用于创建抗体 (CreateAb)、抗体变异 (MutateAb)、亲和度评价 (EvaluateAb)、结果输出 (WriteResult) 和自定义的抗体优化方法 (OptimizeAb,用于封装局部搜索等传统优化算法以加快算法收敛速度,可不重写)。开发应用插件时必须针对具体问题重写以上函数接口,完成问题的建模。操作抗体基因的免疫算子可通过调用上述标准函数完成对基因的操作。此外,优化平台通过抗体基类 CSAntibody 定义了免疫抗体的基本属性(亲和度、抗体长度等)和一般行为。空间优化问题研究者需要结合具体问题设计基因的数据结构,并实现相关操作方法。

### 3 平台应用实例

选取旅行商问题(Traveling Salesman Problem, TSP)作为平台应用测试问题。TSP 问题的基本要求是要查找一条从起点出发,通过所有给定的需求点后,最终再回到起点的最小成本路径。TSP 问题由于其解空间的多维、多局部极值特性,吸引了诸多智能计算研究者的兴趣,并被广泛用于测试和评价智能算法的计算性能。

为综合测试计算平台的免疫算法性能,实验使用 TSP 问题经典测试案例集 TSPLIB95 中的 51 个城市数据集 Eil51 作为测试数据。为测试平台的算法自定义功能,同时提高算法效率,在免疫算法定制界面中添加自定义的交叉算子以引入遗传算法的交叉机制(图 5)。算法基本参数设置为:

种群规模 150、记忆抗体规模 15、增殖系数 0.5、成熟因子 0.25、变异概率 0.06、交叉概率 0.4、种群补充更新比率为 0.1,最大进化代数 100。算法执行 100 代后得到最优解路径长度为 428.982,与已知最优解一致(图 6)。



图 5 免疫算法自定义

Fig. 5 Customize the immune algorithm

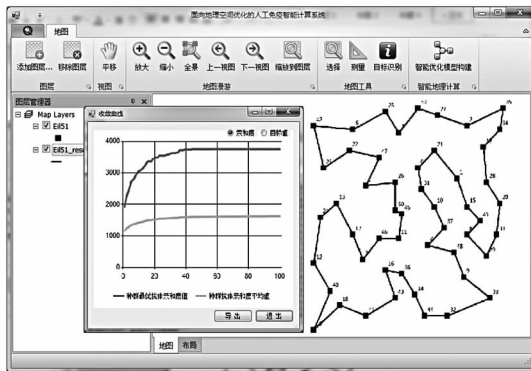


图 6 实验结果

Fig. 6 Result of the experiment

### 4 结论

本文从空间优化问题的特点和实验仿真的实际需求出发,在分析与归纳现有人工免疫算法流程的基础上,建立了面向空间优化的人工免疫优化模型框架,设计了免疫算子插件与空间优化问题应用插件开发接口,开发了基于“插件-平台宿主”架构运行的智能优化平台。研究主要的创新在于:(1)设计了面向地理空间优化问题求解的人工免疫优化模型框架,为构建开放式、可扩展的人工免疫优化平台提供了理论基础。(2)分别设计了免疫算子和优化问题应用插件开发机制,将免疫算法的改进与问题应用的扩展分离。具有不同业务需求的研究者可分别从不同方面对平台算法进行改进或开发面向特定问题的应用插件。空间优化问题研究者只需专注于问题的建模与实现,消除了研究者对人工免疫算法缺乏理解带来

的技术障碍,提高了平台的易移植性和二次开发效率。(3)基于“平台-插件”架构的设计思想有效地解决了在统一计算平台下的不同类型空间优化任务集成问题,为国内外相关研究者与决策部门提供了一个集成、开放的空间优化仿真平台,进而为推进免疫算法在地理空间优化问题研究领域的应用提供有力支持。

## 参考文献 (References)

- [1] Indriasari V, et al. Maximal service area problem for optimal siting of emergency facilities [J]. *International Journal of Geographical Information Science*, 2010, 24(2): 213-230.
- [2] Comber A J, et al. A modified grouping genetic algorithm to select ambulance site locations [J]. *International Journal of Geographical Information Science*, 2011, 25(5): 807-823.
- [3] 戚玉涛, 焦李成, 刘芳. 基于并行人工免疫算法的大规模 TSP 问题求解[J]. *电子学报*, 2008, 36(8): 1552-1558.  
QI Yutao, JIAO Licheng, LIU Fang. Parallel artificial immune algorithm for large-scale TSP [J]. *Acta Electronica Sinica*, 2008, 36(8): 1552-1558. (in Chinese)
- [4] Kang M W, Jha M K, Schonfeld P. Applicability of highway alignment optimization models [J]. *Transportation Research Part C-Emerging Technologies*, 2012, 21(1): 257-286.
- [5] Karadimas N V, et al. Ant colony route optimization for municipal services [J]. *Simulation in Wider Europe European Council Modelling and Simulation*.
- [6] Babbar-Sebens M, Minsker B S. Interactive genetic algorithm with mixed initiative interaction for multi-criteria ground water monitoring design [J]. *Applied Soft Computing*, 2012, 12(1): 182-195.
- [7] Romary T, et al. Sampling design for air quality measurement surveys [J]. *An Optimization Approach, Atmospheric Environment*, 2011, 45(21): 3613-3620.
- [8] Li X, et al. Coupling simulation and optimization to solve planning problems in a fast-developing area [J]. *Annals of the Association of American Geographers*, 2011, 101(5): 1032-1048.
- [9] Sante-Riveira I, et al. Algorithm based on simulated annealing for land-use allocation [J]. *Computer & Geosciences*, 2008, 34(3): 259-268.
- [10] Liu X, et al. Simulating land-use dynamics under planning policies by integrating artificial immune systems with cellular automata [J]. *International Journal of Geographical Information Science*, 2010, 24(5): 783-802.
- [11] Forrest S, et al. Self-nonself discrimination in a computer [C] // *Proceedings of the 1994 IEEE Symposium on Research in Security and Privacy*, May 16, 1994 - May 18, 1994. Oakland, CA, USA: Publ by IEEE.
- [12] de Castro L N, Von Zuben F J. Learning and optimization using the clonal selection principle [J]. *IEEE Transactions on Evolutionary Computing*, 2002, 6(3): 239-251.
- [13] Timmis J, Neal M. A resource limited artificial immune system for data analysis [J]. *Knowledge-based Systems*, 2001, 14(3-4, SI): 121-130.
- [14] 朱玉, 张虹, 孔令东. 一种基于免疫算法的空间关联规则挖掘方法 [J]. *武汉大学学报: 信息科学版*, 2009(12): 1485-1489.  
ZHU Yu, ZHANG Hong, KONG Lingdong. A new spatial association rules mining method based on immune algorithms [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2009(12): 1485-1489. (in Chinese)
- [15] 戚玉涛, 刘芳, 焦李成. 求解 TSP 问题免疫算法的动态疫苗策略 [J]. *西安电子科技大学学报*, 2008, 35(1): 37-42.  
QI Yutao, LIU Fang, JIAO Licheng. Immune algorithm for TSP with dynamic vaccination [J]. *Journal of Xidian University*, 2008, 35(1): 37-42. (in Chinese)
- [16] 梁勤欧, 基于克隆选择算法的障碍布局分配问题研究 [J]. *武汉大学学报: 信息科学版*, 2007(08): 744-747.  
LIANG Qinou. Researches on obstacle location allocation problem based on clonal selection principle [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2007(08): 744-747. (in Chinese)
- [17] Liu X, et al. Zoning farmland protection under spatial constraints by integrating remote sensing, GIS and artificial immune systems [J]. *International Journal of Geographical Information Science*, 2011, 25(11): 1829-1848.
- [18] 黎夏, 李丹, 刘小平, 等. 地理模拟优化系统 GeoSOS 软件构建与应用 [J]. *中山大学学报: 自然科学版*, 2010, 49(4): 1-5.  
LI Xia, LI Dan, LIU Xiaoping, et al. The implementation and application of geographical simulation and optimization systems (GeoSOS) [J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni*, 2010, 49(4): 1-5. (in Chinese)
- [19] 王喜春, 杨金忠. 应用中间件技术的水资源管理系统 [J]. *长江科学院院报*, 2006, 23(03): 21-24.  
WANG Xichun, YANG Jinzhong. Water resources administration system with middleware technology [J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2006, 23(03): 21-24. (in Chinese)
- [20] 吴亮, 杨凌云, 尹艳斌. 基于插件技术的 GIS 应用框架的研究与实现 [J]. *地球科学-中国地质大学学报*, 2006, 31(05): 609-614.  
WU Liang, YANG Lingyun, YIN Yanbin. Plugin-based GIS application framework research and implementation [J]. *Earth Science (Journal of China University of Geosciences)*, 2006, 31(05): 609-614. (in Chinese)
- [21] 卢学鹤, 余光辉, 温小荣, 等. 基于插件技术的森林资源 GIS 的设计与实现 [J]. *南京林业大学学报: 自然科学版*, 2009, 33(01): 127-130.  
LU Xuehe, SHE Guanghui, WEN Xiaorong, et al. Design and realization of geographic information system based on plug-in technology for forest resources management [J]. *Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition)*, 2009, 33(01): 127-130. (in Chinese)
- [22] 刘耀林, 赵翔, 唐旭. 基于插件技术的多用途土地评价信息系统研究 [J]. *中国土地科学*, 2010, (11): 27-34.  
LIU Yaolin, ZHAO Xiang, TANG Xu. Multipurpose land assessment information system based on plug-in technique [J]. *China Land Science*, 2010, (11): 27-34. (in Chinese)