

地质对象表面模型的矢量缓冲区分析算法及其在矿产资源定量评价中的应用

李楠^{1,2)}, 肖克炎^{1,3)}, 宋相龙¹⁾, 李晓晖⁴⁾, 范建福¹⁾, 王琨³⁾

1) 中国地质科学院矿产资源研究所, 北京 100037;

2) 西澳大利亚大学地球与资源学院靶区勘探中心, 西澳大利亚克劳利 WA 6009;

3) 中国地质大学(北京)地球科学与资源学院, 北京 100083;

4) 合肥工业大学资源与环境工程学院, 安徽合肥 230009

摘 要: 基于 GIS 的三维隐伏矿体成矿预测是矿产预测评价领域研究的热点问题, 而构建三维数字矿床模型则是解决该问题的重要手段之一。目前, 在构建三维数字矿床模型方面, 仍有大量问题亟待解决, 特别是基于三维空间分析构建找矿标志的三维模型方面尤为突出。三维缓冲区分析是三维空间分析的基本内容。目前在成矿预测研究中, 通常使用地质对象的栅格模型表达其缓冲区, 但其存在耗时、不精确、可视化效果相对较差的缺点。本文提出缓冲区分析方法, 具有快速、精确、矢量化的特点, 由地质对象的离散化入手, 通过改进的带符号的欧氏距离变换方法和精确的光滑曲面重构算法, 最终获得使用以矢量表达的地质对象的三维缓冲区(带)。基于多个矿区实际的三维地质模型, 从三维可视化、优度与等距性分析等方面开展两种模型的对比实验, 结果表明, 矢量缓冲区分析在三维可视化、计算精度及其算法扩展性方面比栅格缓冲区模型更加适合三维隐伏矿体的定位与定量预测。

关键词: 地质建模; 缓冲分析; 成矿预测; 带符号的欧氏距离场

中图分类号: P618.205; TP391 文献标志码: A doi: 10.3975/cagsb.2015.06.11

3D Buffer Analysis of Geological Surface Model of Geological Objects and Its Application

LI Nan^{1,2)}, XIAO Ke-yan^{1,3)}, SONG Xiang-long¹⁾, LI Xiao-hui⁴⁾, FAN Jian-fu¹⁾, WANG Kun³⁾

1) Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037;

2) Centre for Exploration Targeting, School of Earth and Environment, The University of Western Australia, Crawley, Western Australia WA 6009;

3) School of Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083;

4) School of Resources and Environmental Engineering, Hefei University of Technology, Hefei, Anhui 230009

Abstract: The way that constructs geometry of geological objects and carries out 3D prospectivity research is one of the important and available methods to find concealed mineralization. However, there are currently plenty of problems in 3D modeling for geological objects and quantitative assessment. The difficulty especially lies in constructing 3D geological objects based on calculations of spatial analysis, which are related to mineralization. 3D Buffer Analysis is one of the methods among them. In plenty of 3D prospectivity researches, geologists apply block model of geological objects to express results of buffer analysis. Disadvantages of the way are time-consuming, inexact, and poor visualization effects compared with triangle mesh. Meanwhile, the grid mesh will produce negative influence on the result of quantitative assessment. This paper proposed a method that is

本文由中央级公益性科研院所基本科研业务费项目(编号: K1316)、国家自然科学基金资助项目(编号: 41302262)和中国地质调查局地质大调查项目(编号: 12120114051601)联合资助。

收稿日期: 2015-04-28; 改回日期: 2015-07-12。责任编辑: 闫立娟。

第一作者简介: 李楠, 男, 1980 年生。博士, 副研究员。主要从事三维地质建模计算机算法研究, GIS 矿产资源定量评价。通讯地址: 100037, 北京市西城区百万庄大街 26 号。E-mail: superln1980@126.com。

with rapid, exact and triangulated characteristics. Specially, the method serves as a surface model of geological objects. And it includes 4 steps, i.e., voxelization of geological objects, revising 3D Euclidean Distance Transform and calculating signed distance field, extracting surfaces from the field, and buffer surface construction based on DSI algorithm. Meanwhile, this paper applies buffer analysis to 3D prospectivity and carries out contrasting tests in aspects of 3D visualization effect, requirement and goodness of fit by using 3D models that are from different study areas and represent different kinds of geological situations. The result shows that buffer expressed by triangle mesh is better due to its block model and advantages in quantitative assessment.

Key words: geological modeling; buffer analysis; 3D prospectivity; Signed Euclidean Distance Field

自 Cargill 和 Clark(1978)的研究至今,大量定量预测方法被引入到矿产资源预测与评价的研究(Bonham-Carter et al., 1990; Singer, 1993, 2006; Cheng et al., 1999; Brown et al., 2000; Porwal et al., 2001, 2006; 赵鹏大, 2002, 2007; 赵鹏大等, 2003; Carranza, 2009; ZUO et al., 2009; Carranza and Sadeghi, 2010; Singer and Menzie, 2010; 张道军等, 2013)中, 这些方法与二维 GIS 相结合辅助地质矿产研究人员圈定成矿远景区(靶区)。

当前, 基于三维数字矿床模型(陈建平等, 2012; 肖克炎等, 2012)的矿产资源定量预测与评价研究成为实现三维空间隐伏矿体定位定量预测的重要途径之一。这方面的研究虽然取得大量的成果(陈建平等, 2007, 2012; Wang et al., 2011; 毛先成等, 2012; 李莹等, 2013; 袁峰等, 2014), 但仍存在着诸多尚待解决的问题, 这些问题既包含在预测评价的数学模型中, 如证据权法的独立性检验问题, 也表现在三维地质对象的建模与分析技术方面。例如, 证据权模型(Bonham-Carter et al., 1990; Cheng et al., 1999, 张道军等, 2013)中, 地质控矿要素(翟裕生, 1991)的提取、模型单元与预测单元构建以及厘定找矿标志的影响范围等, 都有可能需要应用三维缓冲区分析技术。在此方面, 研究人员开展了一定的研究工作(毋河海, 1997; 李芳玉等, 2005; 卢新明等, 2012; 袁峰等, 2014)。上述研究工作取得了不错的效果, 但是仍存在重要的不足之处。其一, 缓冲区分析结果的精度低(李芳玉等, 2005); 其二, 数据的冗余较大(李芳玉等, 2005); 其三, 算法面临海量的三维空间计算(毋河海, 1997; 卢新明等, 2012); 最后, 受硬件条件影响, 不具有通用性(袁峰等, 2014)。

1 三维矢量缓冲区分析的实现方法

缓冲区分析的难点是分析结果基本保持等距性且不存在缓冲区曲面自相交(张宏等, 2006)。为了保证等距性, 二维缓冲区算法使用大量的求交计算, 例如凸角圆弧法(张宏等, 2006), 但在三维空间中, 基于求交计算来校正并确保缓冲区的等宽性是不现实的。因此, 必须从根本上改变已有缓冲分析算法的思路。本文提出由地质对象表面模型的离散化入

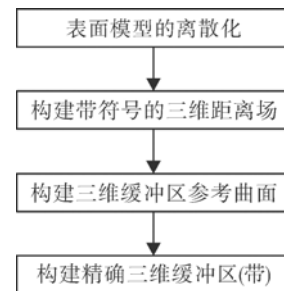


图1 算法总体流程图

Fig. 1 Top-flow-chart of algorithm

手, 通过改进的带符号的欧氏距离变换方法、隐式曲面重构和精确曲面光滑算法(Lorenesen and Cline, 1987; Oliva et al., 1996; Lajaunie et al., 1997; Mallet, 1997; Treece et al., 1999; Calcagno et al., 2008), 构建三角网表达的地质对象的三维缓冲区。方法总体流程如图1所示。总体而言, 本文缓冲区分析方法由四个部分组成。即表面模型的快速离散化、改进的带符号的三维欧氏距离变换、参考曲面构建、基于DSI算法的缓冲区精确重构。本文方法的创新之处在于整合了隐式曲面拟合与精确曲面光滑算法并将之应用于三维缓冲区分析, 解决了之前算法精度低、冗余大、海量三角形求交计算等问题。

1.1 Flood-fill 算法在三维空间中的扩展及表面模型的离散化算法

Flood-fill(Feito et al., 1995)算法是从一个区域中提取若干连通的点并与其他相邻区域区分开的经典算法。该算法扩展到三维空间的关键是解决边界(特征)单元格的快速识别问题。在均匀分割表面模型所在空间的前提下, Flood-fill 的搜索方向根据立方格的位置关系可以分为3类分别为26-邻接、18-邻接和6-邻接。本文的表面模型离散化过程, 将使用6邻接模型, 搜索三维联通区域。

如上所述, 均匀网格分割的结果是由一组立方格表示的有限元实体。在本文中, 一般而言, 立方格的粒度与缓冲距相等。但是, 受到计算机内存容量的限制, 立方格的数量存在一个上限, 即立方格的粒度存在一个下限, 设为 $d_{\min}$; 考虑到参考面的精度(1.3节)与精确重构算法的时间复杂度(1.4节; 2节), 立方格粒度同时存在一个上限, 设为 $d_{\max}$ 。当缓

冲距离小于 $d_{\min}$ 时,立方格粒度仍然保存为 $d_{\min}$;当缓冲距离大于 $d_{\max}$ 时,立方格粒度仍然保存为 $d_{\max}$ 。特别需要指出, $d_{\min}$ 和 $d_{\max}$ 皆是一个相对的数值。在实际应用中,需要根据实际数据与前述规则确定。

1.2 带符号的三维欧氏距离变换

本小节应用带符号的三维距离变换算法(Ye et al., 1988; 蔺宏伟和王国瑾, 2003), 基于 1.1 节的表面模型的离散化结果, 构建带符号的三维欧氏距离场。

由带符号的三维距离变换算法可知(Ye et al., 1988; 蔺宏伟和王国瑾, 2003), 距离场的符号取决于非特征立方格相对于特征立方格的位置。即, 设变换算法由左向右扫描立方格, 则在特征立方格左侧的非特征立方格为正值, 否则为负值, 如图 2 所示。其中, 数值 0 代表特征立方格。数值 1, 2, 3, …, n 表示非特征立方格到最近的特征立方格之间的距离。显然, 这与地质对象的表面模型离散化过程(1.1 节)对于内外立方格的定义部分相反。有鉴于此, 本文对蔺宏伟的算法进行了改进, 使之符合三维缓冲区分析计算的需要。

已知, 由 1.1 节的离散化过程可以将所有立方格分为三类: 体外、体内和边界。本文在蔺宏伟算法的基础上, 增加一个网格内外标志位。定义外部立方格为 1, 内部立方格为 -1。可以得到一个既符合三维欧氏变换规则又可区分内外缓冲区定义的距离场。如图 3 所示。

由 1.1 节可知, 当前有限元实体中每个立方格的粒度都等于缓冲距(除去特殊情况), 因此, 本文方法将绝对值不大于 2 的立方格保留下来, 并计算这些非特征体素上的点到特征网格所包含三角形的一组距离, 并取最短距离作为非特征点到地质对象的表面模型的距离。根据立方格的符号, 最终得到了立方格带符号的距离场。从本质上讲, 构建上述与距离相关的空间索引的时间复杂度是线性的。即, 仅需要计算每一个有限元实体上的结点与特征节点相差格子数, 并根据内外标志位赋予符号。

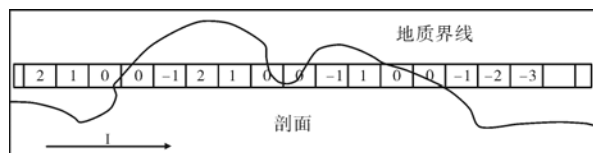


图 2 欧氏距离变换示意图
Fig. 2 Euclidean distance transform

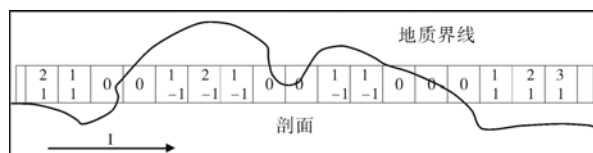


图 3 修改后的欧氏距离变换示意图
Fig. 3 Modified Euclidean distance transform

1.3 参考曲面的提取

本小节在 1.2 节所构建的带符号的距离场的基础上, 应用 Marching Tetrahedron 方法提取缓冲区的参考曲面, 并确保提取的参考曲面不受二义性问题的影响。根据 1.2 节中的距离场, 正距离和负距离可以分别得到一组参考曲面。参考曲面的个数与原始地质对象空间形态以及缓冲距相关。这一组曲面属于原始地质对象的缓冲区(带)。

1.4 基于 DSI 算法的缓冲区精确重构

DSI 算法是由 Mallet(1997)提出的一套地质模型计算机辅助设计方法。其基本思想是基于一个由离散点表达的地质模型, 建立相互之间联系的三角形网络。本文利用 DSI 算法, 在 1.3 节计算结果的基础上, 构建通过缓冲点的光滑缓冲区曲面。

2 算法复杂度分析

如图 1 所示, 本文方法由四部分构成, 且相互之间为串联关系。故, 本文算法的时间复杂度为这四部分算法的时间复杂度之和。

设本文方法总时间复杂度为 T , 其余四部分的时间复杂度分别为 T_1, T_2, T_3, T_4 。设 M 代表原始地质对象表面模型包含的三角形的数量, N 代表离散化后立方格的数量。

本文算法的时间复杂度为 $T=T_1+T_2+T_3+T_4$, 则 $T=O(N)+14\times O(N)+O(N)+2\times O(M)$ 。一般而言, $M\ll N$ 则 T_4 可以忽略不计, 则 $T=16\times O(N)$, 即, $T=c\times O(N)$ 。 c 为常数。

在此需要说明的是, 栅格缓冲区计算在理论上应该快于本文算法。因为, 栅格缓冲区的计算时间为 $T=T_1+T_2$, 即 $15\times O(N)$ 。本文算法在时间复杂度上显然要超过栅格模型, 但是, 这并不是不能够接受的。以付出有限的时间复杂度为代价, 提高了缓冲区分析的精度(图 11), 对于三维成矿预测定量评价来讲, 仍然可以看做是对于原有方法的改进。

3 缓冲区分析在 GIS 矿产资源定量评价中的实例

本节将基于多个矿体、接触、深大断裂以及某具体矿床类型的三维地质模型, 从三维可视化、优选分析、等距性分析等方面开展矢量缓冲区与栅格缓冲区两种分析方法结果的对比实验, 结果表明, 矢量缓冲区比栅格缓冲区更加适合三维隐伏矿体的定量预测。

3.1 矢量缓冲区与栅格缓冲区的三维可视化效果对比

图 4 与图 5 比较了同一个地质体的三维表面模型使用不同算法计算缓冲区的结果。具体而言, 图

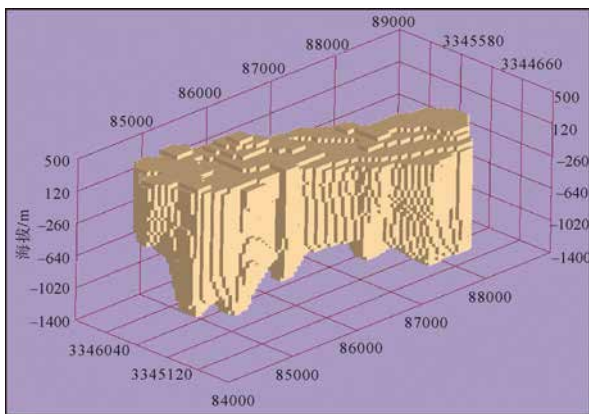


图4 地质体栅格模型 20 m 缓冲区

Fig. 4 Volume's 20m buffer of geological body

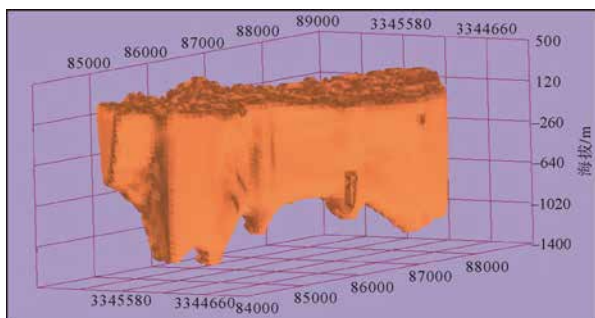


图5 地质体矢量模型的缓冲区

Fig. 5 Triangular 20m buffer of geological body

4展示了使用栅格算法计算缓冲区的结果。图5则是应用本文提出算法计算缓冲区分析结果。显而易见地,使用本文算法得到的缓冲区分析结果更加逼真。

3.2 矿体、接触带、深大断裂构造等地质对象的缓冲区分析结果

(1) 矿体缓冲区

矿床的缓冲区在矢量证据权模型(张道军等, 2013)中得到了实际应用。本文以甲玛铜多金属矿床的矿体为例,进行表面模型缓冲区计算(图6a-d)。

(2) 接触带缓冲区

围岩岩性是矽卡岩及矽卡岩矿床形成的重要条件之一。例如,西藏甲玛铜多金属矿,矿体赋存于林布宗组与多底沟组的接触部位(唐菊兴等, 2010, 2013)(图7),是成矿的有利部位,也是隐伏矿体预测的重要预测要素。该接触带可以由钻孔或者地球物理的采样点通过曲面拟合和缓冲区分析得到(图8)。

(3) 断裂影响域

对于断裂构造控制的矿床、对其进行缓冲区分析,可进一步定量获得断层与矿化的空间关系(图9)。

(4) 岩体顶界面缓冲区计算

对于某些矿床类型,例如玢岩型铁矿如图

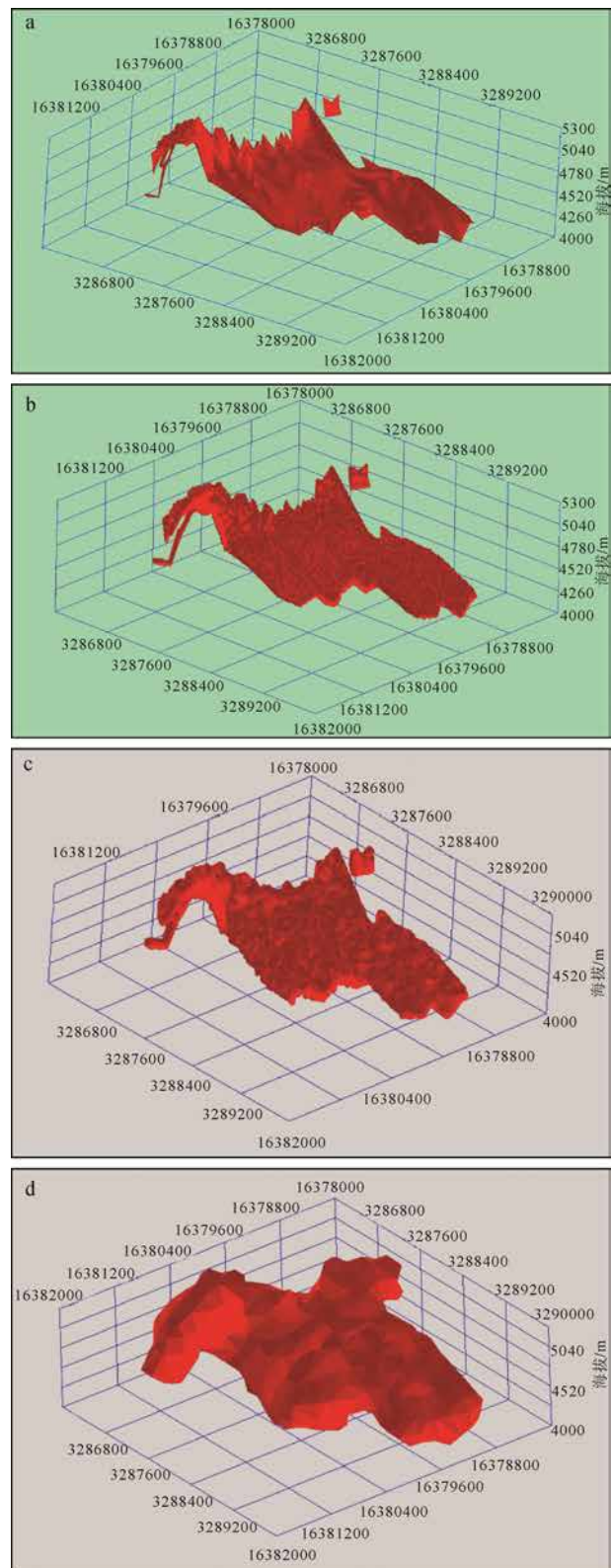


图6 西藏甲玛铜多金属矿床矿体的缓冲区分析

Fig. 6 The buffer analysis of the orebody of the Jima Copper-polymetallic deposit in Tibet

a-矿体; b-20 m 缓冲区分析; c-50 m 缓冲区分析;

d-200 m 缓冲区分析

a-orebody; b-20 m buffer analysis; c-50 m buffer analysis; d-200 m buffer analysis

10(周涛发等, 2011)所示,其亚类既可能发育于矿体与围岩接触部位(1, 4),也可能发育于岩体内部(3)。

因此,在对此类矿床进行缓冲区分析时,根据不同类型,需要分别计算外部或内部缓冲区(图 11)。

由本节的示例可以看出,本文方法可以用于解决任意地质体的缓冲区分析、计算接触带与深大断裂影响域以及岩浆热液型矿床中岩体内、外缓冲区分析问题,能够满足在基于 GIS 的三维矿产资源定量评价实际需求。同时,相比于栅格算法,具有更好的三维可视化效果。

3.3 两种缓冲区三维模型优度分析与等距性分析

以图 5 为例,分析两种模型获取的接触带与矿

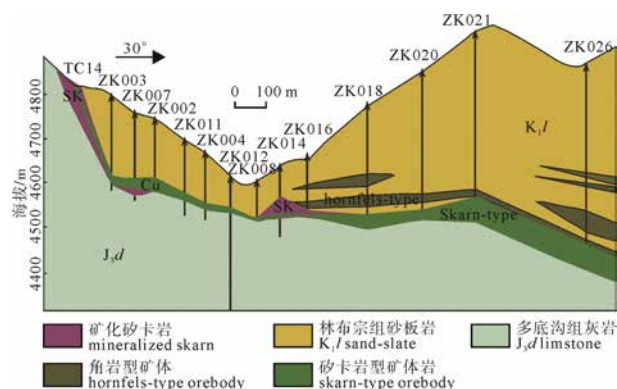


图 7 西藏甲玛铜多金属矿床接触带成矿部位示意图 (唐菊兴等, 2010)

Fig. 7 Contact zone mineralization position of the Jiaoma copper-polymetallic deposit in Tibet (TANG et al., 2010)

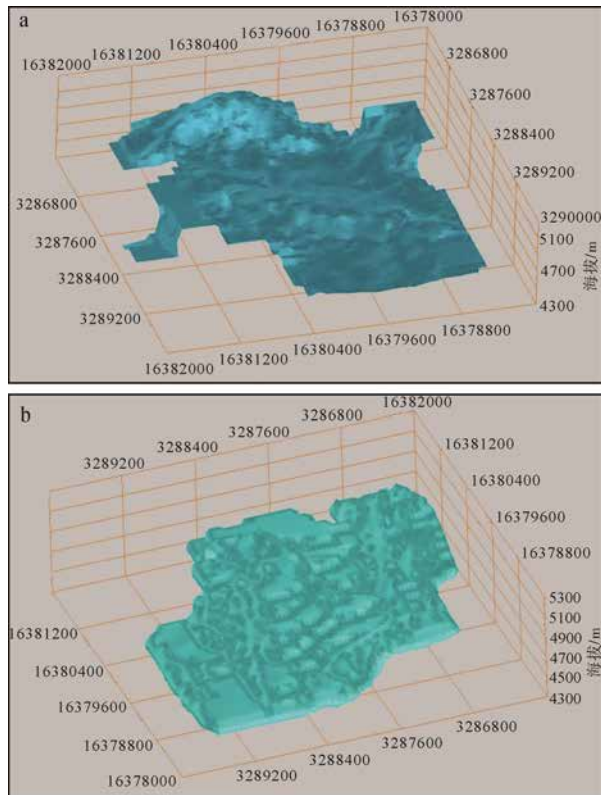


图 8 西藏甲玛铜多金属矿床的接触界面 50 m 缓冲区 (接触带)

Fig. 8 Contact interface 50 m buffer of the Jiaoma copper-polymetallic deposit in Tibet (contact zone)

a-地层接触界面; b-地层的接触界面
a-interface; b-interface zone

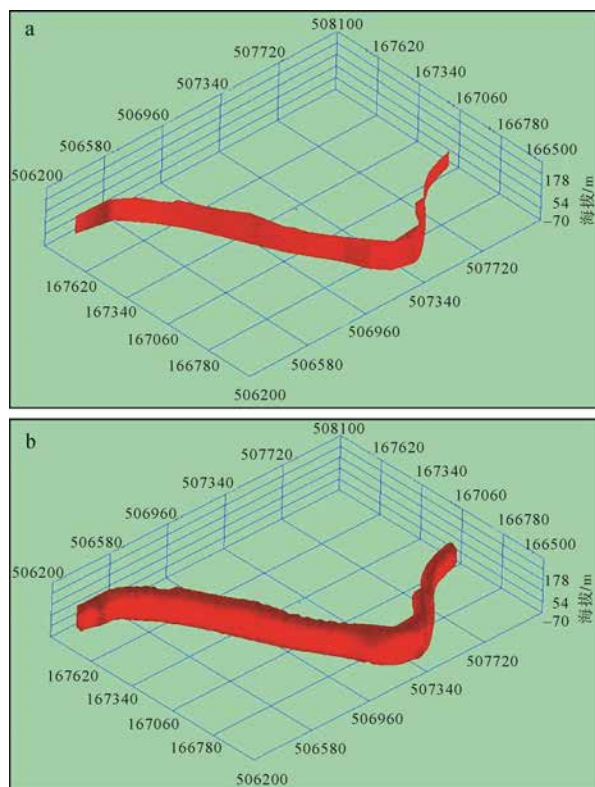


图 9 断裂 100 m 影响域

Fig. 9 The fault 100m influence zone

a-断裂构造; b-断裂构造缓冲区
a-fault; b-influent zone of fault

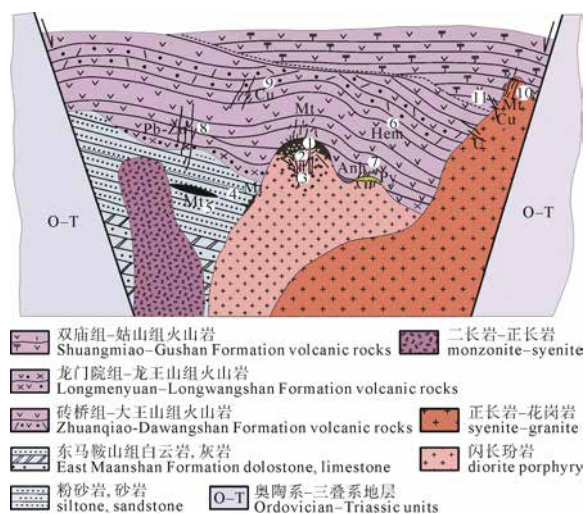


图 10 长江中下游成矿带玢岩型铁矿类型图

Fig. 10 Map showing types of porphyrite iron ore deposits in the middle and lower Yangtze metallogenic belt

Anh-硬石膏矿点; Mt-磁铁矿矿床; Py-黄铁矿矿床; Hem-赤铁矿矿床; Cu-铜矿床; Pb-Zn-铅锌矿床; U-铀矿床;
矿床式: ①-梅山式; ②-罗河-凹山式; ③-泥河-陶村式; ④-姑山-凤凰山式; ⑤-龙桥式; ⑥-盘石岭-龙旗山式; ⑦-大鲍庄-向山式; ⑧-岳山式; ⑨-井边式; ⑩-马口式; ⑪-铜井式
Anh-Anhydrite deposit; Mt-Magnetite deposit; Py-Pyrite deposit; Hem-Hematite deposit; Cu-Copper deposit; Pb-Zn-Pb-Zn deposit; U-Uranium deposit

Ore styles: ①-Meishan styles; ②-Luohe-Aoshan styles; ③-Nihe-Taocun styles; ④-Gushan-Fenghuangshan styles; ⑤-Longqiao styles; ⑥-Panshiling-Longqishan styles; ⑦-Dabaozhuang-Xiangshan styles; ⑧-Yueshan styles; ⑨-Jingbian styles; ⑩-Makou styles; ⑪-Tongjing styles

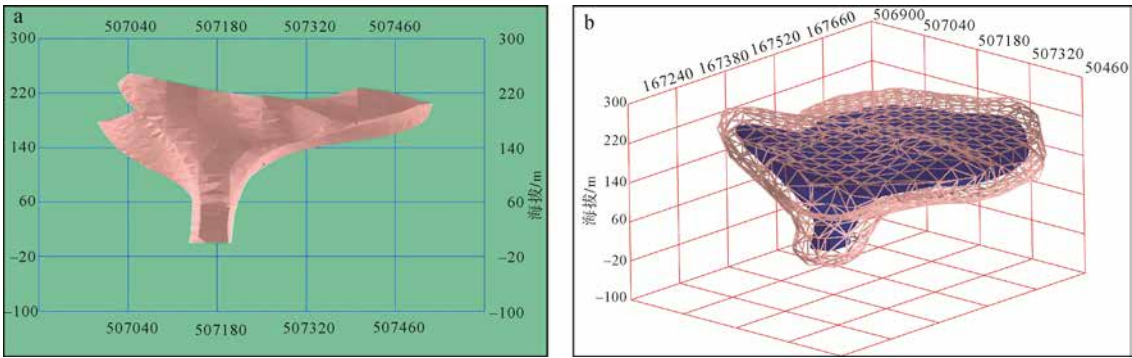


图 11 长江中下游成矿带玢岩型铁矿外缓冲 50 m、内缓冲 20 m
Fig. 11 50 m external buffer and 20m internal buffer of porphyrite iron ore deposits in the middle and lower Yangtze metallogenic belt

表 1 优度分析表
Table 1 Goodness analysis

缓冲距/m	20	30	40	50	60	70
矢量模型的 C 值	1.250	1.187	1.197	1.330	1.435	1.489
栅格模型的 C 值	1.239	1.145	1.164	1.300	1.425	1.461
缓冲距	80	90	100	150	200	
矢量模型的 C 值	1.714	1.769	1.817	1.987	2.669	
栅格模型的 C 值	1.534	1.596	1.630	1.913	2.261	

表 2 平均距离
Table 2 The average distance

缓冲距/m	20	40	50	100	200	500
三角网平均距离	20.106	40.006	50.022	100.016	200.028	502.553
与缓冲距差	0.106	0.006	0.022	0.016	0.028	2.553
六面体网格平均距离	38.191	58.981	68.912	116.219	218.512	519.312
与缓冲距差	18.191	18.981	18.912	16.219	18.512	19.312

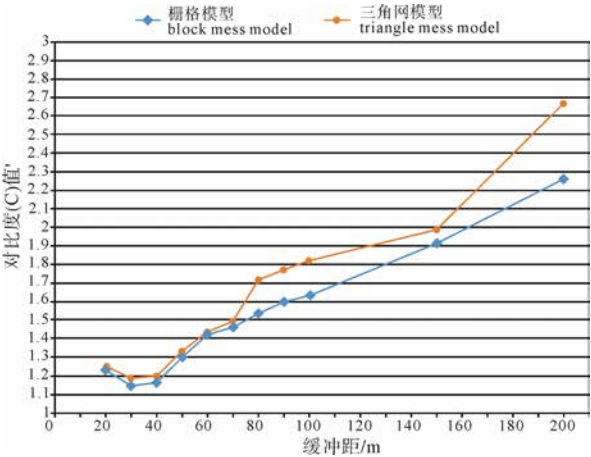


图 12 优度分析图
Fig. 12 Goodness analysis

X 轴表示缓冲距离; Y 轴表示对比度 C 值
The X axis represents real buffer distance; the Y axis represents 'C' value

化之间的关系。在此,本文使用证据权方法中的对比度 C 值用于评价控矿要素与矿化之间相关性(Porwal et al., 2001)。应用上述算法分别构建缓冲距为 20~200 m 之间的接触带。其次,采用对比度 C 值定量分析接触带与矿化之间相关性。本实验地质

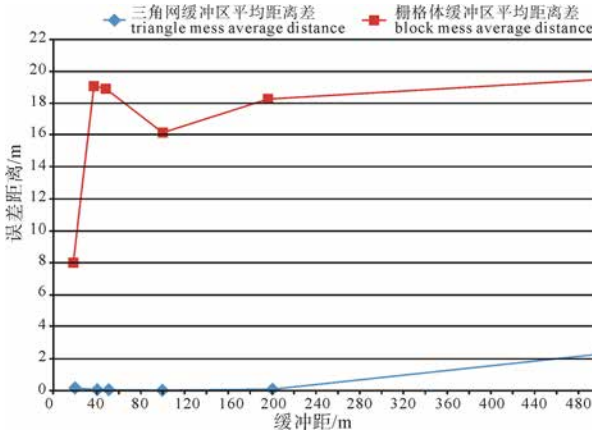


图 13 缓冲区误差距离
Fig. 13 Mean difference

X 轴表示缓冲距; Y 轴表示缓冲区分析结果与初始缓冲距的误差
The X axis represents real buffer distance; the Y axis represents difference between results of buffer analysis and real buffer distance

模型范围为 4000 m×3000 m×1000 m,立方格大小为 50 m×50 m×50 m。具体对比分析情况如表 1 和图 12 所示。

由图 12 可知,红线为三角网模型的 C 值曲线,

蓝线为栅格模型的 C 值曲线。红色曲线总是处在蓝色曲线的上方,则说明由三角网计算得到的接触带与矿化关系更加紧密。更适合在定量计算中使用。

另一个对比试验关于平均距离误差。表 2 和图 13 描述了图 5 中显示的三维对象的表面模型在不同缓冲区分析中,其分析结果距离初始曲面的平均距离。显而易见地,由于本文方法使用了 DSI 算法,使得分析结果更加符合缓冲区分析等距性定义,即更加精确。其中,当使用栅格模型方法时,若缓冲距小于 20,则使用缓冲距作为立方格尺寸;否则,使用长、宽、高均为 20 m 的立方格单元。

4 结论与下一步工作

本文提出了一种精确、快速和矢量化表达的三维空间缓冲区分析方法。该方法包括地质对象的离散化,带符号的欧氏距离变换、隐式曲面重构和精确曲面光滑算法等 4 个主要步骤,最终构建三角网格表达的地质对象的三维缓冲区。所取得的成果主要包含如下内容:

(1)本文提出了一种新的缓冲区计算方法。该算法避免了海量几何图形求交计算,同时,保证了缓冲区计算结果的精度以及良好的三维可视化效果。其主要内容是由地质对象表面模型的离散化入手,通过改进的带符号的欧氏距离变换方法、隐式曲面重构和精确曲面光滑算法,构建由三角网格表达的地质对象的三维缓冲区(图 13 和表 2)。

(2)本文算法为进一步解决矿区比例尺下,深、边部隐伏矿体的 GIS 预测问题提供更加完善的技术支撑。

(3)由第 2 节分析可知,本算法的时间复杂度为 $T=c*O(N)$,呈线性分布,说明本文算法具有很强的实用价值。

(4)本文算法具有良好的扩展性。特别地,本文算法可以调整控制点的密度,进而提高缓冲区分析结果的精度(如 1.4 节所述)。

(5)本文基于矿体、接触界面、深大断裂以及某具体矿床类型的三维地质模型,从三维可视化、优度分析、等距性分析等方面开展矢量缓冲区与栅格缓冲区两种分析方法结果的对比实验,结果表明,矢量缓冲区比栅格缓冲区更加适合三维隐伏矿体的定量预测。

综上所述,本文矢量缓冲区分析方法的特点是由空间曲面重构思想入手,既保证缓冲区分析的等宽性又避免求交计算,同时,使用三角网格表达缓冲区分析的结果。本文方法中精确是指新生成的表

面模型通过一个控制点集,且该点集由原始表面模型上的点沿着缓冲距和法线方向生成。快速是指本文提出改进的三维带符号的欧氏距离变换和 Marching Tetrahedron 或者 Cubes(Lorenesen and Cline, 1987; Treece et al., 1999)算法避免了三维空间中大量三角形相交、重新三角化及曲面之间自动重构拓扑等问题,提高了运算速度和计算机实现后程序的稳定性。而矢量化表达能够进一步提高缓冲区曲面的精确度,并减少了三维成矿预测中定量化过程的计算量。

同时,本文算法也存在着不足。由于需要将地质对象表面模型转换为以立方格为体素的三维有限元实体,如 1.1 和 1.2 所述,导致算法将受到计算机内存容量的限制,立方格的数量存在一个上限,即立方格的粒度存在一个下限。当立方格过多时,会出现内存溢出的情况。这是本文算法下一步改进的方向。但是,由于本文所应用的领域,地质对象的缓冲区分析,在绝大多数情况下,其最小的研究范围缓冲区半径由几十米到几公里。因此,本文的方法仍然可以在绝大多数的情况下满足三维成矿预测评价的实际需要。

Acknowledgements:

This study was supported by China Geological Survey (Nos. 1212011120163 and 12120114002101), National Natural Science Foundation of China (No. 41171009) and Central Public-interest Scientific Institution Basal Research Fund (No. DZLXJK201410).

参考文献:

- 陈建平, 吕鹏, 吴文, 赵洁, 胡青. 2007. 基于三维可视化技术的隐伏矿体预测[J]. 地学前缘, 14(5): 54-62.
- 陈建平, 王春女, 尚北川, 史蕊. 2012. 基于数字矿床模型的福建永梅地区隐伏矿三维成矿预测[J]. 国土资源科技管理, 29(6): 14-20.
- 李芳玉, 潘懋, 朱雷. 2005. 三维缓冲体生成栅格算法研究[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 17(9): 1928-1932.
- 李莹, 肖克炎, 李楠, 邹伟, 张婷婷. 2013. 西藏甲玛铜多金属矿床三维模型分析与深部预测[J]. 地球学报, 34(4): 509-512.
- 蔺宏伟, 王国瑾. 2003. 三维带符号的欧氏距离变换及其应用[J]. 计算机学报, 26(12): 1645-1651.
- 卢新明, 王红娟. 2012. 基于高效布尔运算的三维矢量缓冲区算法[J]. 中国矿业大学学报, 41(3): 481-487.
- 毛先成, 唐艳华, 邓浩. 2012. 地质体的三维形态分析方法与应用[J]. 中南大学学报(自然科学版), 43(2): 588-595.
- 唐菊兴, 王登红, 汪雄武, 钟康惠, 应立娟, 郑文宝, 黎枫信, 郭娜, 秦志鹏, 姚晓峰, 李磊, 王友, 唐晓倩. 2010. 西藏甲玛铜多金属矿床地质特征及其矿床模型[J]. 地球学报, 31(4): 495-506.

唐菊兴, 张志, 李志军, 孙燕, 姚晓峰, 胡正华, 王红星, 宋俊龙, 何林. 2013. 西藏尕尔穷—嘎拉勒铜金矿集区成矿规律、矿床模型与找矿方向[J]. 地球学报, 34(4): 385-394.

毋河海. 1997. 关于 GIS 缓冲区的建立问题[J]. 武汉测绘科技大学学报, 22(4): 358-364.

肖克炎, 李楠, 孙莉, 邹伟, 李莹. 2012. 基于三维信息技术大比例尺三维立体矿产预测方法及途径[J]. 地质学刊, 36(3): 229-236.

袁峰, 李晓辉, 张明明, 周涛发, 高道明, 洪东良, 刘晓明, 汪启年, 朱将波. 2014. 隐伏矿体三维综合信息成矿预测方法[J]. 地质学报, 88(4): 630-643.

翟裕生. 1991. 矿田构造学[M]. 北京: 地质出版社: 32-45.

张道军, 成秋明, 左仁广. 2013. 证据权模型中两种预测单元划分方式对比[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 43(3): 1040-1052.

张宏, 温永宁. 2006. 地理信息系统算法基础[M]. 北京: 科学出版社: 185-199.

赵鹏大, 陈建平, 张寿庭. 2003. “三联式”成矿预测新进展[J]. 地学前缘, 10(2): 455-463.

赵鹏大. 2002. “三联式”资源定量预测与评价——数字找矿理论与实践探讨[J]. 地球科学: 中国地质大学学报, 27(5): 482-489.

赵鹏大. 2007. 成矿定量预测与深部找矿[J]. 地学前缘, 14(5): 1-10.

周涛发, 范裕, 袁峰, 张乐骏, 马良, 钱兵, 谢杰. 2011. 长江中下游成矿带火山岩盆地的成岩成矿作用[J]. 地质学报, 85(5): 712-730.

References:

BONHAM-CARTER G F, AGTERBERG F P. 1990. Weights of evidence modelling: a new approach to mapping mineral potential[J]. Geological Survey of Canada, 89(9): 171-183.

BROWN W M, GEDEON T D, GROVES D I, BARNES R G. 2000. Artificial Neural Networks: A new Method for Mineral Prospectivity Mapping[J]. Australian Journal of Earth Sciences, 47(4): 757-770.

CALCAGNO P, CHILES J P, COURRIOUX G, GUILLEN A. 2008. Geological Modelling from field data and geological knowledge Part I. Modelling method coupling 3D potential-field interpolation and geological rules[J]. Physics of the Earth and Planetary Interiors, 171: 147-157.

CARGILL S M, CLARK A L. 1978. Report on the activity of IGCP Project 98[J]. Mathematical Geology, 10(5): 411-417.

CARRANZA E J M, SADEGHI M. 2010. Predictive mapping of prospectivity and quantitative estimation of undiscovered VMS deposits in Skellefte district (Sweden)[J]. Ore Geology Reviews, 38: 219-241.

CARRANZA E J M. 2009. Objective selection of suitable unit cell size in data-driven modeling of mineral prospectivity[J]. Computers & Geosciences, 35: 2032-2046.

CHEN Jian-ping, LÜ Peng, WU Wen, ZHAO Jie, HU Qing. 2007. A 3D method for predicting blind orebodies, based on a 3D

visualization model and its application[J]. Earth Science Frontiers, 14(5): 54-62(in Chinese with English abstract).

CHEN Jian-ping, WANG Chun-nv, SHANG Bei-chuan SHI Rui. 2012. Three-Dimensional Metallogenic Prediction in Yongmei Region Based on Digital Ore Deposit Model[J]. Scientific and Technological Management of Land and Resources, 29(6): 14-20(in Chinese with English abstract).

CHENG Qiu-ming, AGTERBERG F P. 1999. Fuzzy Weights of Evidence Method and Its Application in Mineral Potential Mapping[J]. Natural Resources Research, 8(1): 27-35.

FEITO F, TORRES J C, URENA A. 1995. Orientation, simplicity and inclusion test for planar polygons[J]. Computers & Graphics, 19(4): 595-600.

LAJAUNIE C, COURRIOUX G, MANUEL L. 1997. Foliation Field and 3D Cartography in Geology: Principles of a Method Based on Potential Interpolation[J]. Mathematical Geology, 29(4): 571-584.

LI Fang-yu, PAN Mao, ZHU Lei. 2005. Research on the Algorithm for 3D Raster Buffer-Generation[J]. Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics, 17(9): 1928-1932 (in Chinese with English abstract).

LI Ying, XIAO Ke-yan, LI Nan, ZOU Wei, ZHANG Ting-ting. 2013. Three-dimensional Model Analysis and Deep Prognosis of the Jiama Copper-polymetallic Deposit in Tibet[J]. Acta Geoscientica Sinica, 34(4): 509-512(in Chinese with English abstract).

LIN Hong-wei, WANG Guo-jin. 2003. Three Dimensional Signed Euclidean Distance Transform and Its Applications[J]. Chinese Journal of Computers, 26(12): 1645-1651(in Chinese with English abstract).

LORENESEN W E, CLINE H E. 1987. Marching Cubes: A High Resolution 3D Surface Construction Algorithm[J]. Computer Graphics, 21(4): 163-169.

LU Xing-ming, WANG Hong-juan. 2012. An algorithm for 3D vector buffer based on efficient Boolean operation[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 41(3): 481-487 (in Chinese with English abstract).

MALLET J L. 1997. Discrete Modeling for Natural Objects[J]. Mathematical Geology, 29(2): 199-219.

MAO Xian-cheng, TAN Yan-hua, DENG Hao. 2012. Three-dimensional morphological analysis method for geologic bodies and its application[J]. Journal of Central South University(Science and Technology), 43(2): 588-595(in Chinese with English abstract).

OLIVA J M, PERRIN M, COQUILLART S. 1996. 3D Reconstruction of Complex Polyhedral Shapes from Contours using a Simplified Generalized Voronoi Diagram[J]. Eurographics, 15(3): 397-408.

PORWAL A, CARRANZA E, HALE M. 2006. A Hybrid Fuzzy Weights-of-Evidence Model for Mineral Potential Mapping[J]. Natural Resources Research, 15(1): 1-14.

PORWAL A, CRARANZA E J M. 2001. Extended Weights of Evidence Modelling for Predictive Mapping of Base Metao Deposit Potential in Aravalli Province, Western India[J]. Exploration

- Mining Geology, 10(4): 273-287.
- SINGER D A. 1993. Basic concepts in three-part quantitative assessments of undiscovered mineral resources[J]. *Nonrenewable Resources*, 69-81.
- SINGER D A. 2006. Typing mineral deposits using their associated rocks, grades and tonnages using a probabilistic neural network [J]. *Mathematical Geology*, 38: 465-474.
- SINGER D, MENZIE W. 2010. *Quantitative Mineral Resource Assessments: An Integrated Approach*[M]. Oxford: Oxford University Press.
- TANG Ju-xing, WANG Deng-hong, WANG Xiong-wu, ZHONG Kang-hui, YING Li-juan, ZHENG Wen-bao, LI Feng-ji, GUO Na, QIN Zhi-peng, YAO Xiao-feng, LI Lei, WANG You, TANG Xiao-qian. 2010. Geological Features and Metallogenetic Model of the Jiama Copper-Polymetallic Deposit in Tibet[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 31(4): 495-506(in Chinese with English abstract).
- TANG Ju-xing, ZHANG Zhi, LI Zhi-jun, SUN Yan, YAO Xiao-feng, HU Zhang-hua, WANG Hong-xing, SONG Jun-long, HE Lin. 2013. The Metallogensis, Deposit Model and Prospecting Direction of Ga'erqing-Galale Copper-gold Ore Field, Tibet[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 31(4): 495-506(in Chinese with English abstract).
- TREECE G M. 1999. Regularised marching tetrahedral: improved iso-surface extraction[J]. *Computers & Graphics*, 23: 583-598.
- WANG Gong-wen, ZHANG Shou-ting, YAN Chang-hai. 2011. Mineral potential targeting and resource assessment based on 3D geological modeling in Luanchuan region, China[J]. *Computers & Geosciences*, 37: 1976-1988.
- WU Hai-he. 1997. Problem of Buffer Zone Construction in GIS[J]. *Journal of Wuhan Technical University of Surveying and Mapping*, 22(4): 358-364(in Chinese with English abstract).
- XIAO Ke-yan, LI Nan, SUN Li, ZHOU Wei, LI Ying. 2012. Large scale 3D mineral prediction methods and channels based on 3D information technology[J]. *Journal of Geology*, 36(3): 229-236(in Chinese with English abstract).
- YE Q Z. 1988. The signed Euclidean distance transform and its applications[J]. *Proceedings of 9th international Conference of Pattern Recognition*, Rome, Italy: 495-499.
- YUAN Feng, LI Xiao-hui, ZHANG Ming-ming, ZHOU Tao-fa, GAO Dao-ming, HONG Dong-liang, LIU Xiao-min, WANG Qi-nian, ZHU Jiang-bo. 2014. Three Dimension Prospectivity Modelling Based on Integrated Geoinformation for Prediction of Bruied Orebodies[J]. *Acta Geologica Sinica*, 88(4): 630-643(in Chinese with English abstract).
- ZHAI Yu-sheng. 1991. *Orefield tectonics*[M]. Beijing: Geological Publishing House(in Chinese).
- ZHANG Dao-jun, CHENG Qiu-ming, ZUO Ren-guang. 2013. A Comparison of Two Different Unit Division Methods in Weights of Evidence[J]. *Journal of Jilin University(Earth Science Edition)*, 43(3): 1040-1052(in Chinese with English abstract).
- ZHANG Hong, WEN Yong-ning. 2006. *GIS algorithm base*[M]. Beijing: Science Press(in Chinese).
- ZHAO Peng-da, CHEN Jian-ping, ZHANG Shou-ting. 2003. The New Development of "Three Components" Quantitative Mineral Prediction[J]. *Earth Science Frontiers*, 10(2): 455-463(in Chinese with English abstract).
- ZHAO Peng-da. 2007. Quantitative mineral prediction and deep mineral exploration[J]. *Earth Science Frontiers*, 14(5): 1-10(in Chinese with English abstract).
- ZHAO Peng-da. 2002. "Three-Component" quantitative resource prediction and assessment: theory and practice of digital mineral prospecting[J]. *Earth Science-Journal of China University of Geosciences*, 27(5): 482-489(in Chinese with English abstract).
- ZHOU Tao-fa, FAN Yu, YUAN Feng, ZHANG Le-jun, MA Liang, QIAN Bing, XIE Jie. 2011. Petrogenesis and Metallogeny Study of the Volcanic Basins in the Middle and Lower Yangtze Metallogenic Belt[J]. *Acta Geologica Sinica*, 85(5): 712-730(in Chinese with English abstract).
- ZUO Ren-guang, CHENG Qiu-ming, FREDERIK P. 2009. Application of a hybrid method combining multilevel fuzzy comprehensive evaluation with asymmetric fuzzy relation analysis to mapping prospectivity[J]. *Ore Geology Reviews*, 35(1): 101-108.