

李蓝蓝,段冰.蚁群算法在地表隐伏断裂识别中的应用的探讨——以九寨沟景区为例[J].地震工程学报,2019,41(4):970-977.  
doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2019.04.970

LI Lanlan,DUAN Bing.Application of the Ant Colony Algorithm on the Identification of Surface Buried Faults; A Case Study of Jiuzhaigou Scenic Spot[J].China Earthquake Engineering Journal,2019,41(4):970-977.doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2019.04.970

## 蚁群算法在地表隐伏断裂识别中的应用的探讨 ——以九寨沟景区为例

李蓝蓝<sup>1</sup>, 段冰<sup>2</sup>

(1. 平顶山职业技术学院, 河南 平顶山 467000; 2. 河南大学, 河南 开封 450044)

**摘要:**在发震地区,准确识别地表断裂带可为地质与地震灾害预测提供基础数据。由于断裂带一般在地表出露是不连续的,在此对基于蚁群算法的地表断裂隐伏段的识别研究进行了尝试,基于遥感图像及航测数据,获取地形、地貌要素以及可以参考的其他要素,使用改进最短对角线方法提取断层表面的图像要素特征作为识别母体,在算法上依次将断裂带三角面片全部配对连接成四面体,再采用蚁群算法进行地表隐伏断裂空间识别。在九寨沟景区中进行了实例探讨,对2017年九寨沟地震的断裂进行尝试性识别,认为该方法可用来初步作为辅助识别地表断裂时的一个参考,同时基于本文方法与其他两种识别方法进行了分析对比。

**关键词:**地震灾区;地下断裂带;蚁群算法;断裂带识别;四面体

**中图分类号:** TP391

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1000-0844(2019)04-0970-08

DOI:10.3969/j.issn.1000-0844.2019.04.970

## Application of the Ant Colony Algorithm on the Identification of Surface Buried Faults: A Case Study of Jiuzhaigou Scenic Spot

LI Lanlan<sup>1</sup>, DUAN Bing<sup>2</sup>

(1. Pingdingshan Vocational and Technical College, Pingdingshan 467000, Henan, China;

2. Henan University, Kaifeng 450044, Henan, China)

**Abstract:** In a seismic area, the accurate identification of the surface fault zone can provide basic data for geological and seismic disaster prediction. In this paper, the recognition of the buried section of a surface fault is studied using the ant colony algorithm. Based on remote sensing image and aerial survey data, the terrain, geomorphological elements, and other elements are obtained. The improved shortest diagonal method is used to extract the image feature of the fault surface. All the triangular patches of the fault zone are matched and connected into tetrahedral in turn;

**收稿日期:** 2018-10-21

**基金项目:** 国家自然科学基金(71503070)

**第一作者简介:** 李蓝蓝(1982—),女,河南平顶山人,讲师,研究方向为旅游管理、旅游地质。E-mail: cola911@163.com。

**通信作者:** 段冰(1978—),女,河南开封人,硕士,讲师,研究方向:旅游管理、计算机及数用应用。E-mail: 15037893028@139.com。

then, the ant colony algorithm is used to carry out the spatial identification of the surface buried fault. Taking the Jiuzhaigou scenic spot as a case study, we discuss the fault identification of Jiuzhaigou earthquake in 2017. It is considered that this method can be used as a reference for the auxiliary identification of surface faults. Meanwhile, the proposed method is analyzed and compared with the other two identification methods.

**Keywords:** earthquake disaster area; underground fault zone; ant colony algorithm; fracture zone identification; tetrahedron

## 0 引言

地震断层在地表中具有分段、断续和分岔的特点,走向或深部产状变化都比较大。断裂带是地质结构里核心特征,全面了解地质断裂带基本信息可准确掌控地震灾区的建筑安全和地震灾害预测。比如 2017 年发生在四川阿坝州九寨沟县的 7.0 级地震,导致一定范围内的地质环境受到严重损害。地震发生后,有关机构学者迅速展开了相关调查和研究,根据实地调查资料,对地震断裂相关问题进行了深入的研究,分析得出地震断裂的分布位置以及活动范围等信息,为有效掌握九寨沟灾区的地质环境提供了基础。由此可见,对地表断裂空间进行研究具有重要意义。

但是断层的地表出露都是不连续的,可是实际断裂在地下却是连续的,通常地震地质工作者在图中直接绘制成一个连续线作为实际断层,但科学的发展需要我们对一些操作进行定量化和数学化,为此提出了要连续绘制这样的标准化问题,但无疑这是一个学科的难点,他涉及到地貌因素,还涉及到地下岩层的产状、岩性的分界、地下水的出露等因素。因而只能从某个方面进行研究,综合得到一个标准。

文献[1]提出依据属性精细刻画断裂带的方法,由于该方法在识别断裂带时,受噪声影响较高,对断裂带属性特性提取存在较高误差,导致识别断裂带结构相似度较低;文献[2]提出断裂带高度确定方法仅能计算断裂带高度,未能提取断裂带横向特征,使得效果具有一定误差;文献[3]提出导水断裂带高度预测方法,该方法仅能适用导水断裂带,使用具有一定的局限性。

基于上述存在的问题,本文初步探索研究了类似的问题,在此对基于蚁群算法的地表断裂的隐伏段的识别研究进行了尝试,基于遥感图像及航测数据,获取地形、地貌要素以及可以参考的其他要素,使用改进最短对角线方法提取断层表面的图像要素

特征作为识别母体,在算法上依次将断裂带三角面片全部配对连接成四面体,再采用蚁群算法进行地表隐伏断裂空间识别。在九寨沟景区中进行了实例探讨,对 2017 年九寨沟地震的断裂进行尝试性识别,同时又对断裂面的特征进行了蚁群算法作为比较识别,以验证方法的可行性。

## 1 非显现断裂空间识别的思路

由于地震灾区地下断裂带的位置具有离散性,断裂带整体结构完整性较差<sup>[4]</sup>。想要获取完整断裂带,必须把相同断裂带离散点相连<sup>[5-6]</sup>。为此,获取地震灾区的遥感图像、航测图像,提取断层表面图像典型特征,以此作为搜索母体进行搜索,并进行断裂带层次特征配对,以实现地震断裂带的离散点连接,在此基础上,运用蚁群算法对地震灾区地表断裂进行空间识别。有关要素的识别体的提供,作者在此以相关文献作为借鉴<sup>[7-8]</sup>。

### 1.1 断裂带图像表面特征的算法要素

当已经确认到断裂带图像表面识别特征要素后,进行母体搜索可采取下列表面几何特征的算法。

#### (1) 表面几何特征算法

使用改进最短对角线方法提取断裂带的表面三角几何结构。将  $i$  层断裂带与  $i+1$  层断裂带上间隔最近的点  $T(i$  层)与点  $U(i+1$  层)连接线设成开始方位,在  $T_1U_1T_2U_2$  建立的四边形里画出最短对角线,构成三角面片,如图 1 所示。

(2) 断裂带三角面片表面特征集合后需要完成断裂带四面体配对<sup>[9]</sup>。依次把第  $i$  层与  $i+1$  层之间里外表面中三角面片使用相同顺序搜索,用图 2 描述。

地震灾区地下断裂带层次四面体配对过程为:

(1) 将 2 个三角形(以下叙述为三角形对)中顶点相连,判定连接后的属性进行剖分获取断裂带对应四面体。

(2) 对内外两层的断裂带三角面片序列根据同一方向往后搜集三角形对。如果其他三角形对的类型一致,跳到(1),反之跳到(4)。

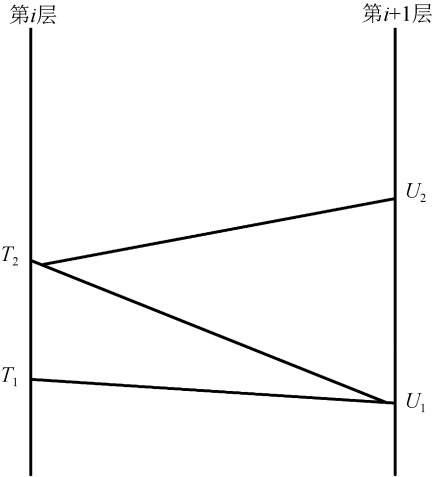


图 1 连接最短对角线构成三角形结构  
Fig.1 Connecting the shortest diagonals to form a triangular structure

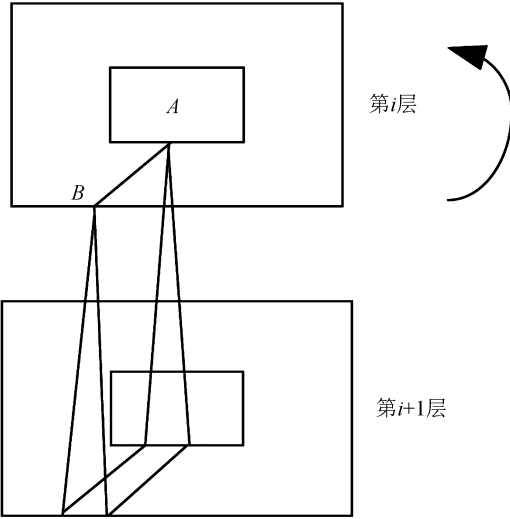


图 2 层次间三角形遍历模型

Fig.2 Inter-level triangle traversal model

(3) 如果其他断裂带三角形对不属于相同类型,提取断裂带三角形对中距离外接圆中心最近点,把最近点的断裂带三角形连接至四面体集合里,按照此方法连接剩余三角形,剖分获取断裂带新的四面体组合,之后跳到(2)。

(4) 在此断裂带三角形对里选取一个三角形,该三角形外心和同一层次中已连接至四面体集合里的三角形外心的间隔最相近<sup>[10]</sup>。把此三角形和同一层次里已连接至四面体集合的断裂带三角形按照相应规则相连,获取新的四面体放到已建立的断裂带四面体集合里<sup>[11]</sup>,完成断裂带层次四面体配对。

1.2 基于蚁群算法的地表断裂空间识别

在以上对断裂带层次四面体配对的基础上,采

用基于蚁群算法获取地震灾区地表断裂带信息。地表断裂空间识别方法的流程是:

(1) 获取研究区遥感航拍图像,标示正半部分中二值图像连通部分。把标示点保存在矩阵 **A** 中,把各个层位水平端点保存在二值矩阵 **B** 中,建立和遥感图像面积相等的矩阵 **C**,用于保存断裂带识别结果。

(2) 把遥感图像分为多个面积是  $i \times j$  的小块,使用蚁群算法识别各个小块中的断裂带。

(3) 扫描各个小块在矩阵 **B** 里对应部分,端点横坐标最小值和最大值分别用  $D$ 、 $E$  描述,若  $D$  和  $E$  间端点数量未大于 2,且垂直距离低于阈值,那么可判定在目前小块里不存在断裂带<sup>[12]</sup>。反之,判定小块里存在一个断裂带,通过  $D$ 、 $E$  可判定蚂蚁巢穴与食物方位。若当下小块上面不存在小块,则在离  $D$  距离最相近点里选择巢穴位置,反之借鉴上述小块食物方位判定目前小块里巢穴方位:

$$W = \min_{NeW} (\|W - R_{above}\|^2 + \|W - R\|^2) \quad (1)$$

式中:小块上方里食物方位用  $R$  描述,需判定的小块里巢穴方位用  $W$  描述。

(4) 想要有效获取最短路径,需要把矩形范围里图像正半部分设成实际“地形”<sup>[13]</sup>。正半部分小块中断层识别过程用图 3 描述。

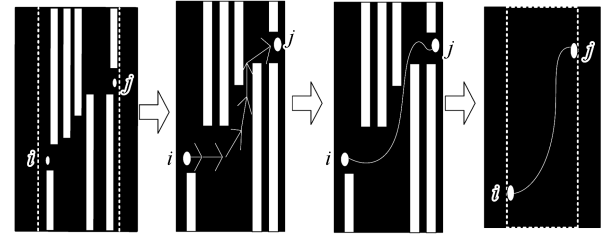


图 3 正半部分小块中断层识别过程

Fig.3 Fault recognition process in positive and semi-partial blocks

(5) 在矩形小块中搜索最短路径的流程是:

第一步:将矩形范围中的正半部分设成三维地形,建立一个三维信息素数组,该三维信息素数组大小是  $e \times i \times 255$ ,把它看作  $e$  个大小是  $i \times 255$  的二维数组集合;

第二步:迭代搜索  $i$  和  $j$  间最短路径,最大迭代次数可以自行设置。每回迭代后便会出现一条从  $i$  至  $j$  的路径,路径里出现  $e$  个点, $i$  与  $j$  之外的点都是蚂蚁通过前一个点获取。详细示意图用图 4 描述。图中,  $N_1 \sim N_2$  表示  $i$  至  $j$  路径中第 2 个点的备选点,  $H_1 \sim H_2$  与  $M_1 \sim M_2$  描述路径中第 3 个与

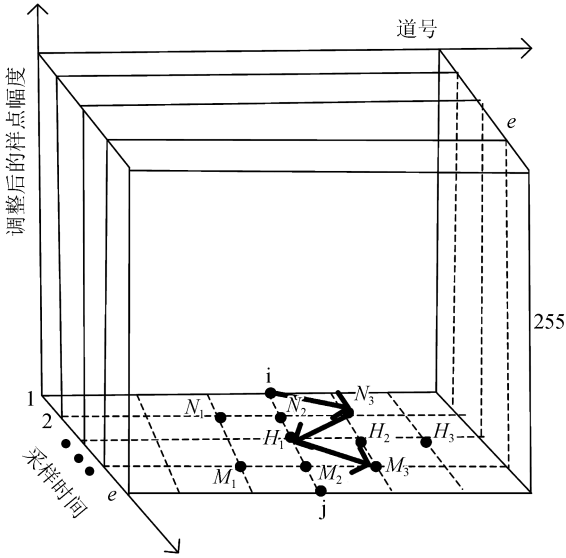


图 4 蚂蚁搜寻最短路径的示意图

Fig.4 A diagram of ants searching for the shortest path

第 4 个点的备选点。各个备选点采样时间坐标与前一个点差值为 1,道号和前一个点间偏移区间是  $-1 \sim 1$ 。蚂蚁被放到路径  $i$  中后,蚂蚁会对比  $N_1 \sim N_2$  点,获取最短路径,对比时,各点的启发值为:

$$\partial = \begin{cases} \frac{\epsilon}{(f_{\text{cur}} - f_{\text{pre}}) \times e}, & f_{\text{cur}} < f_{\text{pre}} \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (2)$$

式中:目前点地震幅度用  $f_{\text{cur}}$  描述; $f_{\text{pre}}$  描述前一个点的地震幅度; $\epsilon$  属于常数。在前一个点至备选点的转移概率为:

$$o_{ij} = \frac{(W_j, R_j, f_j) \times \partial_j}{\sum_{i=1}^3 (W_j, R_j, f_j) \times \partial_j} \quad (3)$$

式中: $m=1,2,3$ ;  $o_{im}$  描述前一个点  $i$  至候选点  $j$  的转移概率,如果蚂蚁到达某候选点的转移概率大于  $0 \sim 1$ ,则将该点当成路径里的点。路径里各点相应信息素的刷新方法为:

$$\lambda(W, R, f) = (1 - q) \times \lambda(W, R, f) \times \Delta\lambda(W, R, f) \quad (4)$$

式中:信息素挥发因子用  $q$  描述; $\lambda$  表示信息素增量,描述蚂蚁在行驶点上产生的信息素总量,其计算方法为:

$$\Delta\lambda(W, R, f) = \epsilon \times \partial_i \quad (5)$$

式中:第  $t$  次迭代后获取的最短路径适应度用  $\partial_i$  表示,可通过式(6)获取:

$$\partial_i = \sum_{i=2}^e (\nu \times \sqrt{1 + (W_i - W_{i-1})^2 + (f_i - f_{i-1})^2 + \rho \times f_i}) \quad (6)$$

式中:点在路径里次序用  $i$  描述; $\nu$  与  $\rho$  均为常数。

通过上述步骤多次迭代后,蚂蚁便能搜索小块里巢穴到食物的最短路径。考虑到巢穴或者食物的方位易受噪声影响,想要通过最短路径识别断裂带,则通过式(7)识别地表断裂:

$$\frac{\text{Con}}{e} < \omega \quad (7)$$

式中:Con 表示路径里样点幅度为最大值的样点数量;阈值用  $\omega$  描述。若最短路径符合式(7),便可判定为断裂带。

对遥感图像正半部分全部小块实行上述处理后,便完成整个图像里断裂带的识别。

## 2 蚁群算法识别隐伏断裂带在九寨沟景区的尝试研究

为验证本文方法的有效性,以九寨沟风景区为例进行实验分析。四川九寨沟风景区位于  $100^\circ 30' \sim 104^\circ 27' \text{E}$ ,  $30^\circ 35' \sim 34^\circ 19' \text{N}$ , 2017 年发生  $M_s 7$  地震,该地震发生在南北地震带中段,青藏高原东缘巴颜喀拉块体与东部华南地块碰撞挤压边界带上,震中及其邻区发育有东昆仑断裂带东端塔藏断裂、虎牙断裂和岷江断裂。中国地震台网中心发布的震中位置为  $103.82^\circ \text{E}$ ,  $33.20^\circ \text{N}$ ,震源深度 20 km,震中距离九寨沟县 39 km,震中 100 km 范围内,九寨沟景区地震前后均有航拍图像,且记录均可完整使用,所获取九寨沟景区遥感图及周边的地震构造图如图 5 (来源为李渝生等<sup>[14]</sup>, 2017)和图6(来源为薛丁等<sup>[15]</sup>,

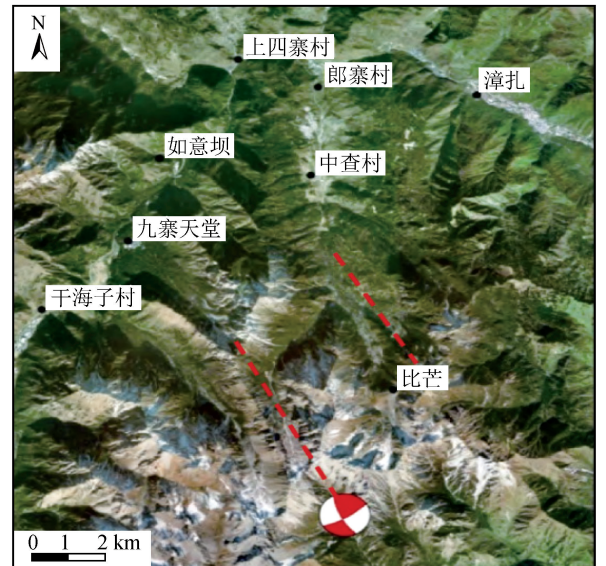


图 5 九寨沟地震震中区域的遥感图

Fig.5 Remote sensing map of the epicenter of Jiuzhaigou earthquake

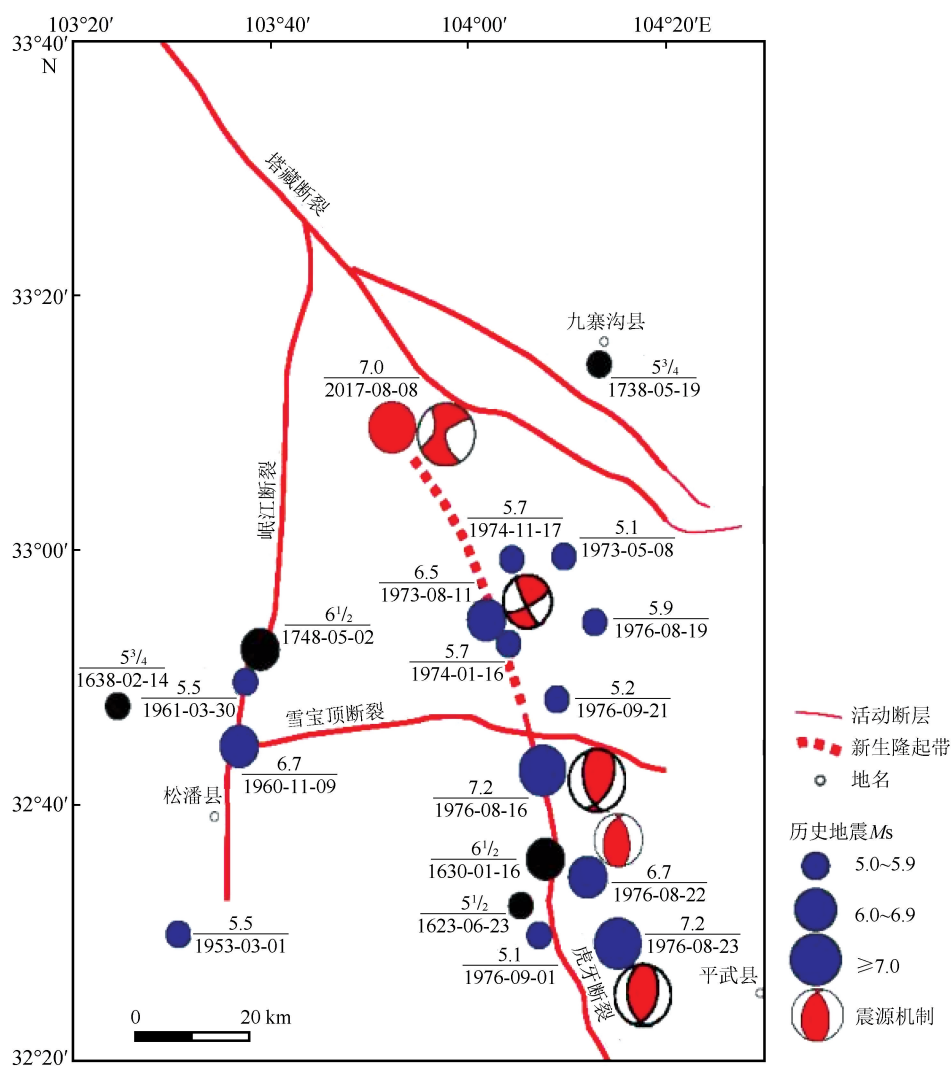


图 6 九寨沟地震周边强震分布与活动构造图

Fig.6 Tectonic map and strong earthquakes around the Jiuzhaigou earthquake

2018)所示,另外还收集与提供了来自于其他系统的卫片与航片资料作为分析的基础。

实验采用本文方法、文献[1]所提的属性精细刻画断裂带方法和文献[2]提出的断裂带高度确定方法对地震后地表断裂进行空间识别,并将识别结果进行对比。

以图 5、6 作为目标识别图像,采用了一些其他参考因素,测试不同方法的断裂识别状况,实验结果如图 7 所示。

由图 7 可知,使用本文方法识别地震断裂具有较高的识别效果,与实际状况相似程度较高。

(1) 结构相似度分析

为进一步验证所提方法的识别效果,设定三处模拟断裂空间识别目标,通过 7 次实验,分别判断三种方法识别结果与原结构的相似度,测试结果分别

用图 8 描述。

分析图 8 可知,在相同实验次数和三种相同实验目标下,本文方法对断裂带的空间识别和原结构的相似度较高,其他两种方法识别相似度最大值分别是 65%和 55%。由此可见本文方法识别地表断裂与原结构的相似度最大,识别效果最好。在此特别声明,也许应用他人方法时的不当,导致其识别过低的问题。

(2) 识别时间的效率分析

基于上述实验设定,统计上述实验中三种方法在识别地震灾区断裂的运行耗时,统计结果用表 1 描述。

分析表 1 可知,相同目标和相同实验次数的前提下,本文方法的运行时间均值为(11.32 s+10.9 s+11.12 s)/3=11.11 s,同理,属性精细刻画断裂带方

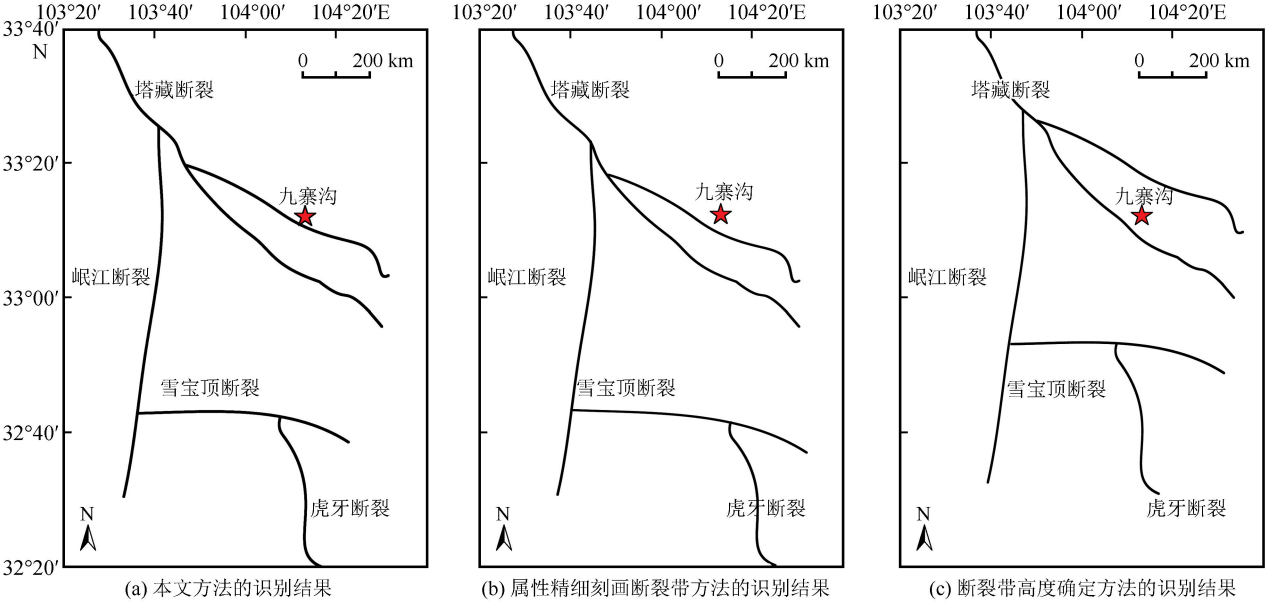


图 7 不同方法的识别结果

Fig.7 Recognition results of different methods

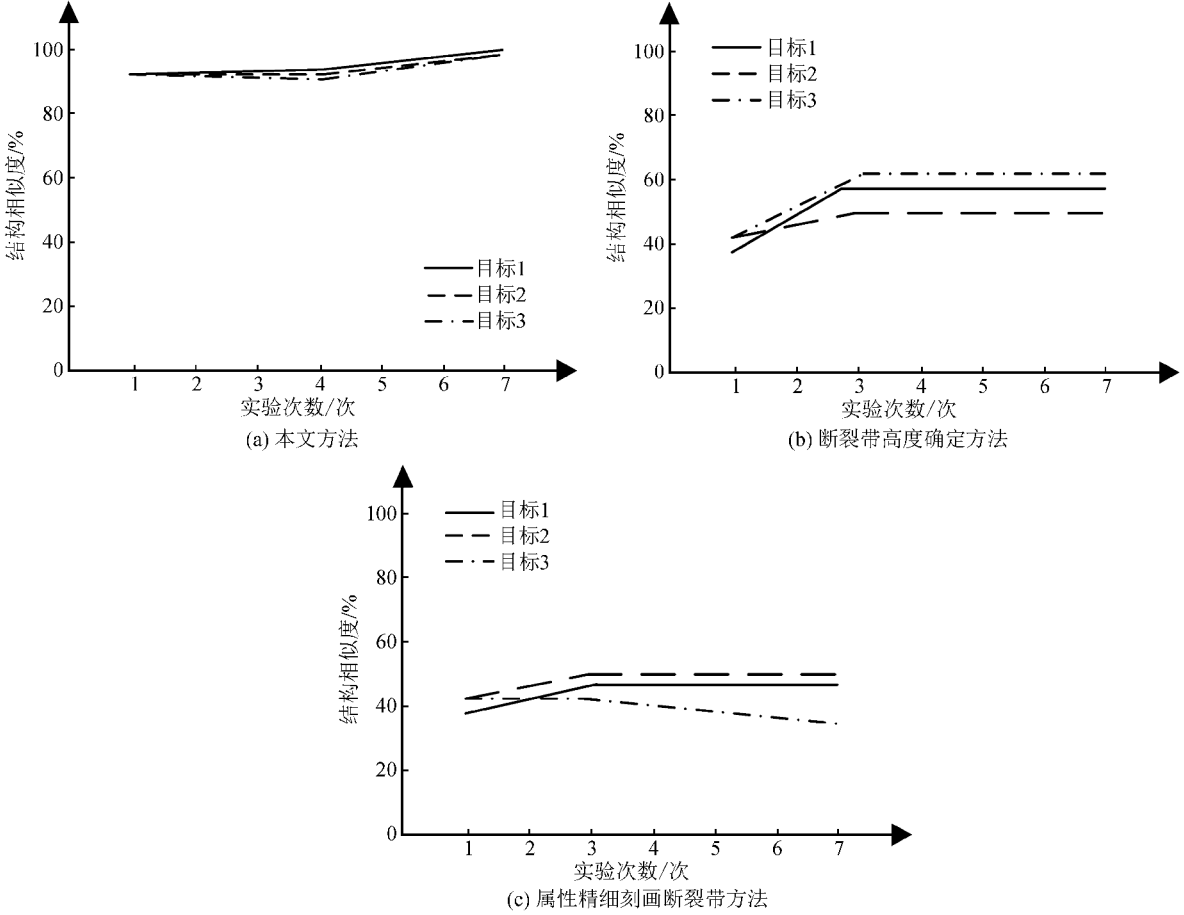


图 8 不同方法相似度识别

Fig.8 Similarity recognition of different methods

法的运行时间的均值为 34.67 s,断裂带高度确定方法的运行时间均值为 47.87 s。将三种方法运行时间均值对比可知,本文方法运行时间最短,空间识别效率最快。

表 1 三种方法的运行耗时(单位:s)

Table 1 Operation time-consumption of tree methods (Unit: s)

| 实验方法        | 实验<br>次数 | 目标 1  | 目标 2  | 目标 3  |
|-------------|----------|-------|-------|-------|
| 本文方法        | 1        | 12.23 | 12.34 | 10.99 |
|             | 2        | 11.99 | 11.1  | 11.22 |
|             | 3        | 10.23 | 10.89 | 10.98 |
|             | 4        | 11.23 | 10.78 | 11.23 |
|             | 5        | 11.11 | 10.65 | 11.11 |
|             | 6        | 11.23 | 10.32 | 11.23 |
|             | 7        | 11.22 | 10.23 | 11.11 |
|             | 均值       | 11.32 | 10.9  | 11.12 |
| 属性精细刻画断裂带方法 | 1        | 34.56 | 35.43 | 34.54 |
|             | 2        | 34.78 | 34.56 | 34.67 |
|             | 3        | 34.76 | 34.78 | 34.65 |
|             | 4        | 34.21 | 34.56 | 34.56 |
|             | 5        | 34.56 | 34.65 | 34.65 |
|             | 6        | 34.75 | 34.78 | 34.65 |
|             | 7        | 34.87 | 34.67 | 34.56 |
|             | 均值       | 34.64 | 34.77 | 34.61 |
| 断裂带高度确定方法   | 1        | 45.65 | 56.43 | 51.34 |
|             | 2        | 47.58 | 45.64 | 47.43 |
|             | 3        | 55.34 | 44.32 | 48.43 |
|             | 4        | 47.53 | 44.76 | 49.23 |
|             | 5        | 48.54 | 46.54 | 47.42 |
|             | 6        | 49.65 | 45.54 | 48.75 |
|             | 7        | 44.54 | 44.76 | 45.76 |
|             | 均值       | 48.40 | 46.86 | 48.34 |

3 结 论

本文研究地表隐伏断裂的空间识别方法,首先采用改进的最短对角线的方法提取三角面片表面几何特征,将三角面片全部配对连接为四面体建立四面体集合,以此求得地震断裂的离散点连续化。在方法思路获取地震区域的目标遥感图像,提取母体识别体的搜索要素,将遥感航拍图划分多个小块后,将各小块最上方和最小方水平端点分别设成蚂蚁巢穴和食物,根据蚂蚁从巢穴出发觅食的过程,将样点的幅度值设成高度值(这里的值是母体搜索的集合因素),通过各个小块中蚂蚁觅食的最短路径即可获取最大可能断裂带,以此识别断裂带的位置。

在文中采用本文方法与属性精细刻画断裂带方法和断裂带高度确定方法进行了对比研究,以九寨沟地区地震进行对比实验。结果表明,本文方法对地表断裂的空间识别和原结构的相似度较高、效率较快,为后期地表断裂空间识别的深入研究提供初步参考。

本文仅作了很初步的研究,只提供了蚁群算法在隐伏断裂识别中的标准化问题。隐伏断裂的展布

与多种要素有关系,这里仅仅是从地表的一些地貌因素和地形因素进行的提取识别,因而是不全面的。由于断裂展布的复杂性,也许分析是错误的,若是能以蚁群算法与隐伏断裂的识别结合起来作为一个方向进行更深入的研究,这也许是本文写作的目的所在。由于本文涉及的内容很多,中间环节也很多,不能一一表达,作者对蚁群和其他方法的算法也存在才疏学浅的问题,错误是肯定难免的,欢迎批评指正。

参考文献(References)

[1] 刘丽华,李军,朱文博,等.一种利用旋转菱形体属性精细刻画断裂带的方法[J].中国海上油气,2016,28(5):8-15.  
LIU Lihua,LI Jun,ZHU Wenbo,et al.A Method of Using Rotating Rhombus Attribute to Finely Describe the Fault Zone [J].China Offshore Oil and Gas,2016,28(5):8-15.

[2] 张凤岩.似膏体充填开采导水断裂带高度确定方法研究[J].煤炭工程,2016,48(2):59-61.  
ZHANG Fengyan.Height Determination of Water Conducting Fractured Zone in Backfill Mining With Paste-like Material[J].Coal Engineering,2016,48(2):59-61.

[3] 王国华,尹尚先,刘明,等.综采条件下导水断裂带高度预测方法[J].煤矿安全,2017,48(11):187-190.  
WANG Guohua,YIN Shangxian,LIU Ming,et al.Height Prediction Methods of Water Flowing Fractured Zone Under Condition of Fully-mechanized Mining[J].Safety in Coal Mines,2017,48(11):187-190.

[4] 刘备,朱光,胡红雷,等.郯庐断裂带江苏段新构造活动规律分析[J].地质学报,2015,89(8):1352-1366.  
LIU Bei,ZHU Guang,HU Honglei,et al.Analysis on Neotectonic Activity of the Jiangsu Part of the Tanlu Fault Zone[J].Acta Geologica Sinica,2015,89(8):1352-1366.

[5] 陈亚军,付广,包迎春,等.铲式断层空间特征研究进展综述[J].地质力学学报,2017,23(3):451-458.  
CHEN Yajun,FU Guang,BAO Yingchun,et al.A Review on the Research Progress of Spatial Characteristics of Listric Fault [J].Journal of Geomechanics,2017,23(3):451-458.

[6] 丰成君,张鹏,戚帮申,等.郯庐断裂带附近地壳浅层现今构造应力场[J].现代地质,2017,31(1):46-70.  
FENG Chengjun,ZHANG Peng,QQ Bangshen,et al.Recent Tectonic Stress Field at the Shallow Earth's Crust near the TanLu Fault Zone[J].Geoscience,2017,31(1):46-70.

[7] 宋家慧.基于压缩传感的 SRM 断面图像重建方法研究[J].计算机仿真,2016,33(2):132-137.  
SONG Jiahui. Image Reconstruction of SRM Cross-Section Based on Compressed Sensing[J].Computer Simulation,2016,33(2):132-137.

[8] 李大虎,廖华,梁明剑,等.龙门山中央断裂南段盐井一五龙断

- 裂的浅层地球物理方法探测[J].地震工程学报,2016,38(1):26-35.
- LI Dahu, LIAO Hua, LIANG Mingjian, et al. Detection of the Yanjing—Wulong Fault in the Southern Segment of the Longmenshan Central Fault Zone by Using Shallow Geophysical Method[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2016, 38(1):26-35.
- [9] 殷文,李援,郭加树,等.基于改进蚁群追踪策略的地震层位自动识别方法[J].石油地球物理勘探,2017,52(3):553-561.
- YIN Wen, LI Yuan, GUO Jiashu, et al. Seismic Horizon Automatic Identification Based on Ant Colony Tracking Strategy[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2017, 52(3):553-561.
- [10] 岳彩亚,党亚民,杨强,等.川滇地区次级地块及其主要断裂带现今活动研究[J].大地测量与地球动力学,2017,37(2):176-181.
- YUE Caiya, DANG Yamin, YANG Qiang, et al. Analysis of the Current Activity in Sichuan—Yunnan Region and Its Sub Blocks of Main Faults[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2017, 37(2):176-181.
- [11] MIAO C, DING M T. Social Vulnerability Assessment of Geological Hazards Based on Entropy Method in Lushan Earthquake-Stricken Area [J]. Arabian Journal of Geosciences, 2015, 8(12):10241-10253.
- [12] 张明,高涵,牛玉芬,等.2016 年门源地震震源机制 DInSAR 同震形变反演[J].地球物理学进展,2017,32(3):1089-1094.
- ZHANG Ming, GAO Han, NIU Yufen, et al. Coseismic deformation Focal Mechanisms Inversion for 2016 Menyuan Earthquake by DInSAR Observations[J]. Progress in Geophysics, 2017, 32(3):1089-1094.
- [13] CHANG M, TANG C, VAN ASCH T W J, et al. Hazard Assessment of Debris Flows in the Wenchuan Earthquake-Stricken Area, South West China[J]. Landslides, 2017, 14(5):1783-1792.
- [14] 李渝生,黄超,易树健,等.九寨沟 7.0 级地震的地震断裂及震源破裂的构造动力学机理研究[J].工程地质学报,2017,25(4):1141-1150.
- LI Yusheng, HUANG Chao, YI Shujian, et al. Study on Seismic Fault and Source Rupture Tectonic Dynamic Mechanism of Jiuzhaigou  $M_{87.0}$  Earthquake [J]. Journal of Engineering Geology, 2017, 25(4):1141-1150.
- [15] 薛丁.九寨沟的地震构造及其地震活动[J].四川地震,2018(1):5-9.
- XUE Ding. Earthquake Structure and Seismicity Injiuzhaigou [J]. Earthquake Research in Sichuan, 2018(1):5-9.