

运用拓扑学原理研究汶川与唐山地区 公路网络的稳定性^①

张东辉¹, 何政伟^{1,2}, 赵银兵¹, 杨 斌^{1,3}

(1. 成都理工大学地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室, 四川 成都 610059;

2. 中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所, 四川 成都 610041;

3. 中国地震局地质研究所, 北京 100029)

摘要:汶川地震与唐山地震几乎将当地生命线系统完全损毁。以评价在近场地震作用下的城镇生命线系统的“稳健性”为研究目标,采用地震灾害比较学中拓扑学原理,计算两地公路网络相关评价参数并进行分析。参数包括拓扑指数($TI(G)$)、拓扑逆指数($TII(G)$)和节点孤立指数(NSI)等。研究得出公路网络“稳健性”唐山震后(2008年)最优,汶川(2007年)次之,唐山震前(1975年)最低的结论。从纯数学角度引入最优化理论,认为在复建原有公路前提下加修北川到安县等五条公路,区域分散性最高,且节点孤立指数最小,这时的公路网络易损性最低。

关键词: 拓扑学; 生命线系统; 公路网络; 汶川地震; 唐山地震; 稳定性

中图分类号: TP183; P208

文献标识码: A

文章编号: 1000-0844(2009)03-0221-06

Study on the Stability of Road Networks in Wenchuan and Tangshan Region Using Topology Theory

ZHANG Dong-hui¹, HE Zheng-wei^{1,2}, ZHAO Yin-bing¹, YANG Bin^{1,3}

(1. National Laboratory of Geo-hazard Prevention and Geo-environment Protection, Chengdu University of Technology,

Chengdu 610059, China; 2. Institute of Mt. Hazards & Environment; CAS, Chengdu 610041, China;

3. Institute of Geology, China Earthquake Administration, Beijing 100029, China)

Abstract: In Wenchuan earthquake and Tangshan earthquake the local lifeline systems were almost totally damaged. To evaluate the "stability" of the local lifeline systems under the condition of near field earthquake, the evaluation parameters of the two road nets are calculated and analyzed based on the theory of earthquake disaster comparatology. Those parameters are Topological Index ($TI(G)$), Topological Inverse Index ($TII(G)$) and Node Solitude Index (NSI) etc. The result shows that the "Stabilities" from low to high are Tangshan Before-earthquake (1975), Wenchuan Before-earthquake (2007), Tangshan After-earthquake (2008). It is concluded that five additional roads, Beichuan to Anxian and so on, should be built in case of rehabilitation the existing roads before Wenchuan earthquake with the optimization theory from a purely mathematical point of view, in which the local road nets would be the highest regional dispersion, the smallest node isolation index, and would be most stability.

Key words: Topology; Lifeline systems; Road net; Wenchuan earthquake; Tangshan earthquake; Stability

① 收稿日期: 2008-09-10

基金项目: 四川省杰出青年学科带头人培养计划项目(06ZQ026-014); 四川省教育厅自然科学重点项目(2006A116)

作者简介: 张东辉(1985-), 男(汉族), 山西平陆县, 硕士研究生, 主要从事地震遥感监测及 3S 综合应用技术。

0 引言

地震灾害比较学是以发生在不同地区的地震灾害为研究对象,通过比较来揭示地震灾害规律和特征的科学。是共享地震灾害经验教训,减轻地震灾害风险以及揭示地震灾害发生机理的重要手段^[1]。其主要任务有三:一是对地震灾害进行描述、分析和分类,并详细地比较不同地震灾害的特征,确定和阐明之间的关系;二是研究和开发比较方法和比较工具;三是揭示地震灾害的规律和特征,提出减轻地震灾害风险的措施和建议^[2]。

地震造成受灾地区生命线系统破坏,涉及范围广且破坏严重。我国震灾最严重的两次地震是1976年唐山7.8级地震和2008年汶川8.0级地震,其中唐山地震造成交通瘫痪,电力和通讯中断;汶川地处山区,强震造成10多万人的汶川县与外界道路中断,通信中断超过10个小时。随着城市化进度的加快,电力、通信、交通、供水、供气和排水等生命线系统更加密集和复杂。本文以唐山和汶川两次大震为例,对城市生命线网络在近场地震作用下的灾情进行分析和比较,研究如何科学合理地布设和建设这些生命线系统,提高抗灾能力,为指导灾区灾后重建工作提供科学的分析依据。

1 汶川地震与唐山地震的基本情况

1.1 自然条件

汶川地处四川省西北部、阿坝州东南部的岷江两岸。县境东西宽84 km,南北长105 km,总面积4 084 km²,位于北纬30°45′~31°43′与东经102°51′~103°44′之间。东北部为龙门山脉所控,西南部受制于邛崃山系。地势由西北向东南倾斜,西部多分布海拔3 000 m以上的高山,东南部漩口地区的海拔780 m^[3]。

唐山市位于河北省东部。东西宽约130 km,南北长约150 km,总面积为13 472 km²,界于北纬38°55′~40°28′与东经117°31′~119°19′之间。北部和东北部多山,海拔在300~600 m之间;中部为燕山山前平原,海拔在50 m以下,地势平坦;南部和西部为滨海盐碱地和洼地草泊,海拔在15 m至10 m以下^[4]。

1.2 地震参数

汶川地震与唐山地震的基本参数及灾害损失见表1。

表1 唐山地震和汶川地震参数和损失

	唐山地震	汶川地震
发震时间	1976年7月28日3时42分	2008年5月12日14时28分
震级/M	7.8	8.0
持续时间/s	14~16 s	80 s
震源深度/km	12~16 km	10~20 km
震中位置	39°38′N, 118°11′E	31°N, 103.4°E
烈度峰值/I	XI	XI
死亡人数/人 ^①	242 769	69 207
受伤人数/人 ^①	164 851(重伤)	374 216
经济损失 ^②	直接经济损失50亿美元	直接经济损失超万亿元人民币
房屋破坏	全部倒塌32 219 186间	全部倒塌5 461 900间
生命线系统破坏	电力、交通和通信系统破坏,通向唐山的公路和铁路大多中断	电力、交通和通信系统完全破坏,通向汶川的公路全部中断
严重程度	建国以来人员伤亡最严重的地震灾害	建国以来造成巨大人员伤亡震级最高的地震灾害
地震经验	中国历史上首次发生在平原城市的地震灾害	山区强震造成大量人员伤亡和重大经济损失

注:① 伤亡人数:汶川地震伤亡人员统计截至2008年7月31日12时;② 经济损失:唐山地震是1976年价格,汶川地震是2008年价格。说明:唐山地震数据源自参考文献[1],汶川地震数据源自网络实时信息。

2 理论和方法

2.1 图论方法模拟生命线系统网络

用节点(代表城镇)和连线(代表两城镇之间的连接公路)组成的图(Graph)来模拟城镇之间的生命线网络。图G的定义如下:

$$G = (X, A) \quad (1)$$

式中, X 为节点的集合, A 为连线的集合($A = X \times X$)。设 $a_{ij} \in A$ 代表一对节点(X_i, X_j)之间的连线数, n 和 l 分别为节点数和连线数,则有

$$n = |X| \quad l = 0.5 \left(\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n a_{ij} \right) \quad (2)$$

如每对节点均有通路,即两城镇均有生命线连接,则称图G所代表的生命线网络是“相邻连线生命线网络”^[1]。因此对相连的网络增加连线总是意味着增加网络的赘余度。这种增加连线而形成的赘余度有两种情况:一种是在已经有连线的节点之间增加连线,即使网络对节点而言更加“局部集中”;另一种是在尚无连线的节点之间增加连线,即使网络对节点而言更为“局部分散”。一个生命线网络越集中,则在近场地震作用下越容易损坏。这就是说,增加生命线网络的集中度,在近场地震作用下就相当于使一些节点增加陷入孤岛的可能性,因为这些节点之间的多道连线可能同时遭到毁坏。

当没有两个或两个以上的连线连在同一点(即一个节点只与一条线相连)时,称这些连线为“非相

邻连接生命线网络”。设 $P(G, k)$ 是 A 的有 k 个非相邻连线组成的子集合数, 则称 $P(G, k)$ 为“ k 级非相邻连接数”, 可用来度量“局部分散度”^[1]。

2.2 拓扑指数法评价生命线系统聚散度

分子化学学家 Haruo Hosoya 教授于 1971 年在上述非相邻连接数基础上提出了拓扑指数(TI)的概念^[1]。图 G 的拓扑指数定义为

$$TI(G) = \sum_{k=0}^m P(G, k) \quad (3)$$

式中, 如节点数 n 为偶数, 则取 $m = n/2$; 如节点数 n 为奇数, 则取 $m = (n-1)/2$ 。研究发现 $P(G, 0)$ 总为 1, 因为所有节点都没有连线只有一种组合; $P(G, 1)$ 总为 l , 因为相邻两个节点有一根连线也只有 l 种组合。Haruo Hosoya 用 $TI(G)$ 分析分子结构和其物理—化学性质之间的关系, 发现了碳氢化合物的 $TI(G)$ 与其沸点之间有着很好的相关性。

TI 是描述图的局部分散度的性能指数。虽然也可以间接用来度量图的局部集中属性, 但是拓扑逆指数(Topological Inverse Index) $TII(G)$ 可以直接来描述图的局部集中属性^[5]:

$$TII(G) = \sum_{k=0}^m \{C_k^l - P(G, k)\} = \sum_{k=0}^m C_k^l - TI(G) \quad (4)$$

式中, $TII(G)$ 是有 n 个节点, l 条连线中有 k ($k=0, 1, \dots, m$) 个相邻连线的图 G 的子集合; $\sum_{k=0}^m C_k^l$ 为总拓扑指数 TT (Total Topological Index)。

$$\begin{aligned} TT(G(n, l)) &= \sum_{k=0}^m C_k^l \\ &= \sum_{k=0}^m l(l-1)(l-2)\dots[l-(k-1)]/k! \\ &= \sum_{k=0}^m l!/(l-k)!k! \end{aligned} \quad (5)$$

由式(4)可得

$$TI(G) + TII(G) = TT(G(n, l)) \quad (6)$$

即图的局部分散性越高, 则其局部集中性越低。

2.3 生命线系统中节点的孤立指数

对于有 n 个节点和 l 条连线的图 G , 所有图 G 的带 n 个节点子图数为 2^l 。 n 个节点, l 条连线中有 k ($k=0, 1, \dots, m$) 个相邻连线的图 G 的子图数同这个子图数的比值为

$$w = \frac{TT(G(n, l))}{2^l} \quad (7)$$

于是, n 个节点, 非相邻连线的子图数和 n 个节点, l 条连线的子图数之比为

$$NSI = w \times \frac{TII(G)}{TT(G(n, l))} = \frac{TII(G)}{2^l} \quad (8)$$

式(8)就是节点孤立指标(Node Solitude Index, NSI)的定义。对于不同连接数的图, 可通过节点孤立属性, 用 NSI 来比较公路网络的易损性。

3 拓扑学原理在两地公路网络系统的应用

鉴于生命线系统多种数据获取的困难, 通过选择生命线系统中的公路网络数据, 采用上述理论来计算并评价两地公路网络的“稳健”程度。首先获取相关公路交通图, 处理后得到模拟图形; 其次, 应用地震灾害比较学算法, 对这些公路连接模拟图“稳健性”进行评价; 最后, 从纯数学方法角度(指的是暂不考虑地形地貌、建造成本等现实因素), 探讨最优化理论指导下的汶川地区灾后重建公路线路设计方案。

3.1 两地公路网络数据的获取

唐山地区选取京津唐地区公路网络数据。分别对震前(1975年)和现今(2008年)这一地区公路交通图进行扫描形成数据集, 在 MapGIS7.0 软件下进行矢量化和制图综合^[6-7]。在此基础上得到京津唐地区的公路网经过图论方法处理后的数据(图1)。

根据国家地震现场应急工作队绘制的“汶川 8.0 级地震烈度分布图”, 选取烈度 VII 及其以上的县市作为研究对象。与唐山地区公路网络数据的获取方法和流程类似, 统计省道、国道以及高速公路的数量, 得到汶川地区公路网经过图论方法处理后的模拟图(图2)。

3.2 计算结果的评价与应用

按照地震灾害比较学的相关理论, 采用 C# 语言编写计算程序^[8], 分别计算唐山地区震前、震后和汶川地区震前(2007年)公路网络的拓扑指数、拓扑逆指数以及节点孤立指数(表2), 评价这些网络的“稳健性”和节点的“易损性”。

拓扑指数(TI)是描述图的局部分散度的性能指标。唐山震前 TI 为 1905, 震后为 13 663, 对比得出唐山地区经过这些年公路的建设, 线路分布分散性明显提高。由拓扑逆指数得出 2008 年唐山地区城镇之间的局部集中性降低, 说明整体公路网络稳定性加强, 抗灾性能明显提高。由于节点数差异, 汶川与唐山拓扑指数无比较意义。但节点孤立指数

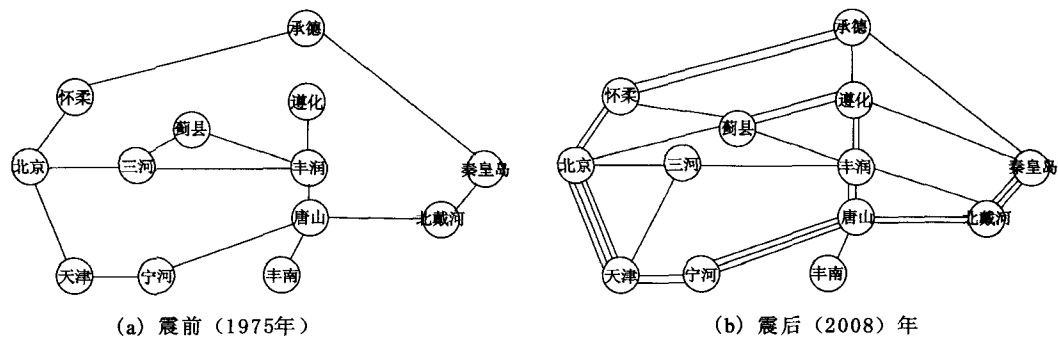


图 1 中国京津唐地区震前与震后公路网络模拟图

Fig. 1 Roads net graph before and after (2008) earthquake in Tangshan region.

表 2 汶川地震与唐山地震相关数学模型计算结果

	唐山震前	唐山震后	汶川震前 2008 年公路网络	
图/G	图 1(左)	图 1(右)	图 2	
节点数/ n	13	13	22	
连线数/ l	15	36	45	
k 级非相邻连接数 ($P(G,K)$)	$k=0$	1	1	$k=7$ 632 929
	$k=1$	15	36	$k=8$ 382 510
	$k=2$	160	567	$k=9$ 107 827
	$k=3$	561	2 911	$k=10$ 10 302
	$k=4$	760	5 728	$k=11$ 125
	$k=5$	360	3 852	—
	$k=6$	48	568	—
拓扑指数($TI(G)$)	1 905	13 663	1 914 150	
拓扑逆指数($TIH(G)$)	8 044	2 377 833	14 495 496 036	
总拓扑指数($TT(G(n,l))$)	9 949	2 391 496	14 497 410 186	
图 G 带 n 节点子图数(2^l)	32 768	68 719 476 736	35 184 372 088 832	
相邻连线子图数同总数比(w)	0.303 6	0.000 034 80	0.000 412 0	
节点孤立指标(NSI)	0.245 5	0.000 034 60	0.000 411 9	

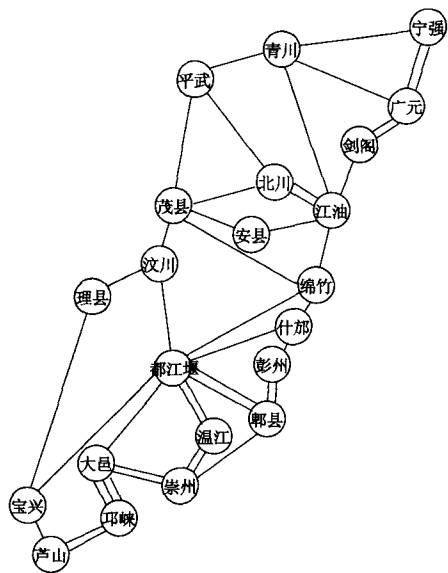


图 2 汶川地区公路网络模拟图

Fig. 2 Roads net graph in Wenchuan region.

(NSI)是经过标准化后的数据,对于不同连线数的图,可通过节点孤立属性比较公路网络的易损性。

对比得出,唐山震前、震后(2008 年)、汶川震前(2007 年)三个公路网络的节点孤立属性分别为 0.245 5、0.000 034 60 和 0.000 411 9,发现唐山震后(2008 年)的网络孤立性最低,也就是近场地震作用下节点与外界断绝联系的可能性最小,其次是汶川震前(2007 年),节点孤立性最高的是唐山震前公路网络。可见虽然节点数和公路网络不同,但节点孤立指标(NSI)能够较客观地反映不同地点不同时间点的公路网络的抗灾能力。

3.3 最优化理论指导下的公路网络系统模拟设计

通过研究汶川地区现今公路连接情况,评价出这个区域公路线路稳定性,不但能从数值模拟角度分析线路抗灾能力,而且对于灾后重建工作都有一定的参考价值。汶川地震发生后救灾难度异常大,主要原因就在于交通的完全中断。从拓扑学角度考虑结构的“稳健性”,重新规划设计路线,在施工成本和合理连线间选择最优化的设计是很有必要的^[9-10]。

以汶川公路网络为例,在修建可能性存在的前提下,将所有可连接的成对节点添加进来(图3)。用最优化模型(式(9))计算虚线依次连接情况下的NSI值。

$$\min NSI = \left[\sum_{k=0}^m C_k^i - \sum_{k=0}^m P(G, k) \right] / 2^i \quad (9)$$

经计算^[11-12],选取节点孤立指数(NSI)值最小的3、4、5、6、8号线路连接的话,拓扑指数($TI(G)$)为4 851 744,拓扑逆指数($TII(G)$)为14 492 558 442,节点孤立指标(NSI)为0.000 411 903。此时节点孤立指数(NSI)最低,是所有方案中最优的。根据这一结论,在灾后重建中修建“北川 $\leftrightarrow$ 安县、安县 $\leftrightarrow$ 绵竹、绵竹 $\leftrightarrow$ 汶川、都江堰 $\leftrightarrow$ 理县、都江堰 $\leftrightarrow$ 崇州”这5条公路,对整体区域的局部分散性最高,局部集中性最低,且节点孤立指数最小,说明这时的公路易损性最低。

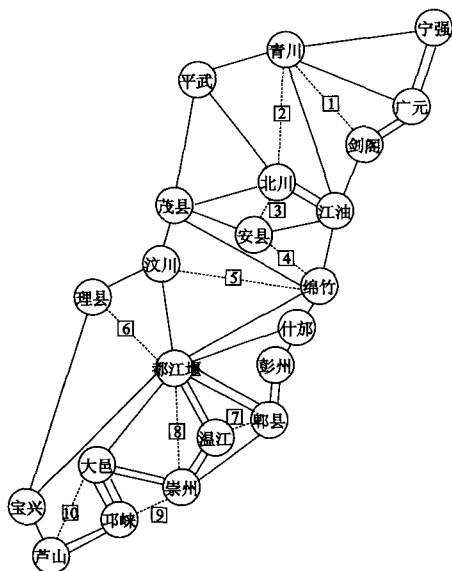


图3 汶川地区公路网络添加成对节点后交通模拟图

Fig. 3 Roads net graph after adding possible lines in Wenchuan region.

4 结论及进一步的研究

引入地震灾害比较学相关理论,通过对比分析唐山和汶川地震案例,获得以下结论及需要进一步研究的内容:

(1) 采用拓扑指数法定量化地评价公路网络图的“稳健性”,局部分散度的 $TI(G)$ 能够描述网络局部分散性,而局部集中度($TII(G)$)可以直接对网络中节点的集中属性进行评价。节点孤立指数(NSI)

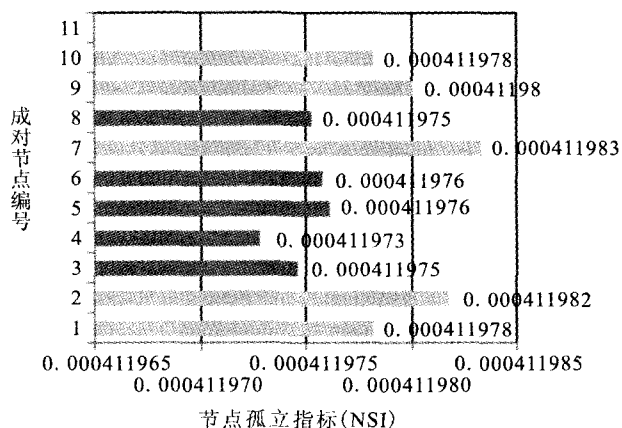


图4 汶川地区公路网络添加成对节点后的各个节点孤立指数

Fig. 4 Node Solitude Index (NSI) of Roads net graph after adding possible lines in Wenchuan region.

可以很好地表达公路网络的易损性。通过对比研究唐山震前(1975年)、唐山震后(2008年)以及汶川震前(2007年)的网络图,分析出公路网络“稳健性”唐山震后(2008年)最优,汶川(2007年)次之,唐山震前(1975年)最低的结论。

(2) 从地震灾害比较学的纯数值角度出发,在最优理论指导下,模拟并设计了新的汶川公路网络连接图。认为在复建原公路前提下,加修北川到安县等5条公路,区域分散性最高,集中性最低,且节点孤立指数最小,这时的公路网络易损性最低。

(3) 在研究过程中发现虽然拓扑指数 $TI(G)$ 可以作为公路网络系统抗震性能的评价标准,但是从理论上讲,随着图 G 的 TI 值增大,对于不同节点的网络,为了能从拓扑指数 $TI(G)$ 和拓扑逆指数 $TII(G)$ 上进行对比研究,必须要将数据进行标准化操作。叶耀先(2007)等提出的解决方法是对于所有可能的网络形态计算 TI 值的分布,并检验在 TI 值分布中目标网络所处位置的方法^[1,13]。但是由于各个城镇由于地理和景观条件的限制,拓扑图的形状极其复杂,这并不是一种好的方法。如何解决这个问题是后续需要研究的内容。

[参考文献]

- [1] 叶耀先,冈田宪夫.地震灾害比较学[M].北京:中国建筑工业出版社,2008.
- [2] 叶耀先.地震灾害风险管理和实施技术[J].地震工程与工程振动,2006,26(3):11-17.
- [3] <http://baike.baidu.com/view/384989.htm>.
- [4] 河北省地震局.唐山抗震救灾决策纪实[M].北京:地震出版社,2000.

- [5] Ye Yaoxian, Okada Norio. Improving management of urban earthquake disaster risks[A] // Proceedings of China-US Millennium Symposium on Earthquake Engineering[C]. China, 2000.
- [6] 杨斌,何政伟. WebGIS技术在地震灾害防御中的设计探讨[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2007, 18(4): 70-73.
- [7] 路鹏,刘瑞丰,李志雄,等. 地震科学数据的分级分类探讨[J]. 西北地震学报, 2007, 29(3): 248-255.
- [8] H M Deitel, P j Deitel. C# University Tutorial[M]. Beijing: Tingshua University Publishing House, 2003.
- [9] M Turker, B T San. Detection of collapsed buildings caused by the 1999 Izmit, Turkey earthquake through digital analysis of post-event aerial photographs[J]. INT. J. Remote Sensing, 2004, 25(21): 4701-4714.
- [10] 冯建刚. 利用双差地震定位法对民乐—山丹地震序列重新定位[J]. 西北地震学报, 2008, 30(1): 62-65.
- [11] 史培军,杜鹃,叶涛,等. 加强综合灾害风险研究,提高应对灾害风险能力——从第6届国际综合灾害风险管理论坛看我国的综合减灾[J]. 自然灾害学报, 2006, 15(5): 1-6.
- [12] Donald Hearn. Digital Image Process[M]. American: Prentice Hall, 1998.
- [13] 刘齐茂,燕柳斌. 强震作用下框架结构的优化设计[J]. 西北地震学报, 2008, 30(2): 107-112.

(上接 210 页)

- [13] 郭晓,张元生,莘海亮,等. 甘东南地区非弹性衰减系数、震源参数和场地响应研究[J]. 中国地震, 2007, 23(4): 383-392.
- [14] 郭晓,张元生,莘海亮,等. 青藏高原东北缘地区非弹性衰减Q值和场地响应的研究[J]. 地震研究, 2008, 31(2): 114-118.
- [15] Spence W. Relative epicenter determination using P-wave arrival-time differences[J]. Bull. Seism. Soc. Am, 1980, 70(1): 171-183.
- [16] Waldhauser F, Ellsworth W L. A Double Difference Earthquake Location Algorithm: Method and Application to the Northern Hayward Fault, California[J]. Bull. Seism. Soc. Am. 2000, 90(6): 1353-1368.
- [17] 杨智炯,陈运泰,郑月军,等. 双差地震定位法在我国中西部地区地震精确定位中的应用[J]. 中国科学(D辑), 2003, 33(增刊): 129-134.
- [18] 荣代路,李亚荣. 基于“双差法”地震精确定位研究 2002 年 12 月 14 日玉门 5.9 级地震的发震断层和发震机制(英文)[J]. 西北地震学报, 2004, 26(3): 223-227.
- [19] 王海涛,李志海,赵翠萍,等. 新疆北天山地区 $M_s \geq 2.0$ 地震震源参数的重新测定[J]. 中国地震, 2007, 23(1): 47-55.
- [20] 莘海亮,张元生,郭晓,等. 2004 年 6 月甘肃临泽震群地震精确定位[J]. 西北地震学报, 2008, 30(1): 71-74.
- [21] 周民都,张元生,张树勋,等. 遗传算法在地震定位中的应用[J]. 西北地震学报, 1999, 21(2): 167-171.
- [22] 王家映. 地球物理反演理论(第二版)[M]. 北京: 高等教育出版社, 2002: 136-145.
- [23] 傅淑芳,刘宝诚. 地震学教程[M]. 北京: 地震出版社, 1991: 83-85.
- [24] 姚姚. 地球物理反演基本理论与应用方法[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 2002: 16-18.
- [25] 高尔根,徐果明. 二维速度随机分布逐步迭代射线追踪方法[J]. 地球物理学报, 1996, 39(增刊): 302-308.
- [26] 国家地震局地质研究所,国家地震局兰州地震研究所. 祁连山—河西走廊活动断裂带[M]. 北京: 地震出版社, 1993.
- [27] 陈柏林,王春宇,宫红良,等. 关于河西走廊盆地榆木山北缘断裂晚第四纪活动特征的新认识[J]. 地质通报, 2007, 26(8): 976-983.