

利用 sPn 震相对宁夏地区近年有感地震震源深度重定位^①

吕俊强, 李青梅, 赵卫东, 蔡新华, 陈春梅

(宁夏回族自治区地震局, 宁夏 银川 750001)

摘要:宁夏十五数字地震观测台网自投入使用以来, 积累了大量的地震数字波形。利用宁夏台网中震中距在 1 000 km 范围内不同台站记录的 9 次 $M \geq 3.0$ 地震的 sPn 与 Pn 震相进行分析、计算这些地震的震源深度。研究表明, 利用 sPn 与 Pn 震相的到时差计算地壳内近震深度的方法简捷、准确。

关键词: sPn 震相; Pn 波到时差; 近震; 震源深度

中图分类号: P315.61

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2016)01-0046-05

DOI: 10.3969/j.issn.1000-0844.2016.01.0046

Using sPn Phase to Relocate Focal Depths of Felt Earthquakes of Recent Years in Ningxia Area

LV Jun-qiang, LI Qing-mei, ZHAO Wei-dong, CAI Xin-hua, CHEN Chun-mei

(Earthquake Administration of Ningxia Hui Autonomous Region, Yinchuan 75000, Ningxia, China)

Abstract: Focal depth, the vertical distance from an earthquake source to the ground (the epicenter), is one of the basic earthquake parameters and is one of the most difficult of the seismic parameters to accurately determine. The accurate determination of the focal depth involves a series of important problems including a correct understanding of the earthquake preparation process, the earthquake mechanism, its geological structure, and the stress field. Since the fifteen stations of the Ningxia digital seismic observation network were officially established in 2009, a large volume of digital seismic waveform data has accumulated, and much research work has been possible. On the basis of previous studies, using the lag of the sPn and Pn phases, in this study, we calculated the focal depth of nine earthquakes with $M \geq 3.0$, which occurred in the area surrounding Ningxia in recent years. The results of the sPn method are mainly dependent on the velocity model selection and precision of the seismic phase. We selected the approved and widely used Ningxia local velocity model. The Pn and sPn phases and reading accuracy are particularly important, because the initial amplitude of this type of wave phase is generally weak. As such, if there is an arrival time difference of 0.5~1 s, it may result in a calculation error of 1.5~3 km in the focal depth. With the availability of multiple records of the sPn phase, using the averages of each calculation depth, it is possible reduce the error caused by the reading. Research shows that it is a relatively simple matter to accurately calculate the near-earthquake depth within the crust using the lag of the sPn and Pn phases. Determining the exact value of the focal depth can provide an

① 收稿日期: 2015-08-20

基金项目: 中国地震局测震台网青年骨干培养专项(20140325)

作者简介: 吕俊强(1978—), 男, 工程师, 主要从事地震监测预报工作。E-mail: 84630932@qq.com。

通信作者: 李青梅(1976—), 女, 工程师, 主要从事地震监测预报工作。

important criterion in earthquake research with respect to the causal factors of the formation and structure of deep crustal activities.

Key words: sPn phase; Pn time difference; near shock; focal depth

0 引言

震源深度是从震源到地面(震中)的垂直距离,是目前最难被准确测定的地震参数之一,而震源深度的准确测定^[1-3]关系到对地震的孕育过程、发震机理、地质构造和应力场等一系列重要问题的正确认识。上世纪苏联学者提出在近震中可以观测到 sPn 震相,并给出双层地壳结构模型中 sPn-Pn 的走时方程。近年来随着数字地震记录的普及,特别是中国地震局“九五”、“十五”项目建设以来,国内学者对利用 sPn 与 Pn 震相的到时差计算震源深度进行了大量的研究工作。如:房明山等^[4]用 sPn 震相测定近震震源深度;高立新等^[5]用 sPn 震相计算震源深度的初步分析与应用;任克新等^[6]用 sPn 计算内蒙地震的震源深度;王登伟^[7]用 sPn 与 Pn 波走时差测定近震震源深度的方法等。

2009 年宁夏十五数字地震观测台网正式投入使用以来,积累了大量的数字地震波形资料并开展了基础性研究工作^[8]。本文拟在前人研究的基础上,利用 sPn 与 Pn 震相的到时差计算宁夏及周边近年来发生的 9 次 $M \geq 3.0$ 地震的震源深度。

1 sPn 震相记录特征

sPn 波是横波 S 在地面的转换波。横波 S 入射到地表被反射转换为纵波 P 后,入射到莫霍界面(M 界面),当入射角等于临界角时,纵波 P 沿 M 界面向前滑行形成 Pn 波,由于该震相是由横波 S 转换来的,记为 sPn。其仍然保持着横波的动力学特征,振幅与周期均大于纵波,最终在地震记录上以纵波形式出现,所以垂直分向显示清晰,其振幅和周期均大于 Pn。由于与 Pn 都属于首波,初动振幅较微弱^[9-11]。

由于 sPn 波是由 S 波的 Sv 成分转换成的波,设 v_1 、 v_2 分别为上、下地壳内纵波 P 的传播速度, v_{S1} 、 v_{S2} 分别为横波 S 在上、下地壳内传播速度, v_3 为纵波 P 在莫霍界面的传播速度(即: Pn 的传播速度), h 表示震源深度, h_1 为震源到康拉德界面(上下地壳分界面)的深度, H_1 表示上地壳厚度, Δt 为 sPn-Pn 的走时差。

单层地壳结构中 sPn-Pn 的走时差方程为^[1]:

$$T_{sPn} - T_{Pn} = h \left[\frac{v_3^2 - v_{S1}^2}{v_3 v_{S1} (v_3^2 - v_{S1}^2)^{1/2}} + \left(\frac{1}{v_1^2} - \frac{1}{v_3^2} \right) \right] \quad (1)$$

双层地壳结构中分为两种情况:(1)震源在上地壳内,波的传播路径如图 1(a);(2)震源在下地壳内,波的传播路径如图 1(b)。图 1 中, O 点表示震源位置,角 i 满足公式 $\sin i = v_1/v_2$ 。震源在上地壳内, sPn-Pn 的走时差方程为^[1]:

$$T_{sPn} - T_{Pn} = h \left(\frac{1}{\cos \alpha_1 v_{S1}} + \frac{1}{\cos i_1 v_1} \right) - \frac{h (\operatorname{tg} \alpha_1 + \operatorname{tg} i_1)}{v_3} \quad (2)$$

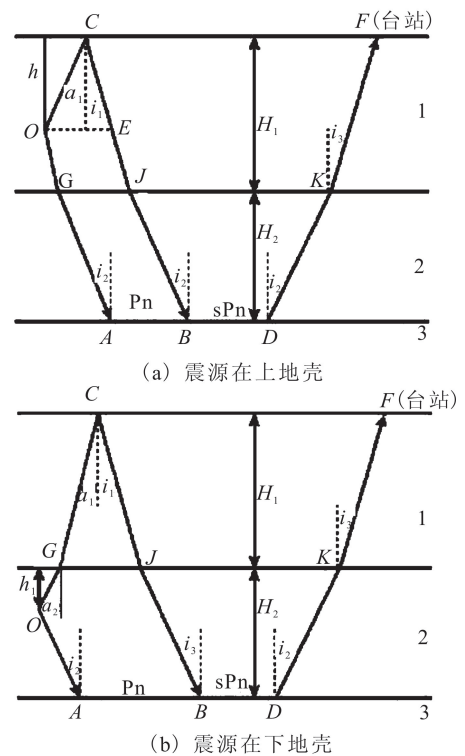


图 1 sPn 与 Pn 波的传播路径图

Fig.1 The ray path of sPn and Pn

根据 Snell 定律,可推得:

$$\Delta t = T_{sPn} - T_{Pn} = h \left(\frac{\sqrt{v_3^2 - v_{S1}^2}}{v_3 v_{S1}} + \frac{\sqrt{v_3^2 - v_1^2}}{v_3 v_1} \right) \quad (3)$$

震源在下地壳内, sPn-Pn 的走时差方程为:

$$\Delta t = T_{sPn} - T_{Pn} = \frac{h_1 v_3}{v_{S2} \sqrt{v_3^2 - v_{S2}^2}} + \frac{H_1 v_3}{v_{S1} \sqrt{v_3^2 - v_{S1}^2}} +$$

$$\frac{H_1 v_3}{v_1 \sqrt{v_3^2 - v_1^2}} + \frac{h_1 v_3}{v_2 \sqrt{v_3^2 - v_2^2}} - \frac{1}{v_3} \left(\frac{h_1 v_2}{\sqrt{v_3^2 - v_2^2}} + \frac{H_1 v_1}{\sqrt{v_3^2 - v_1^2}} + \frac{h_1 v_{S2}}{\sqrt{v_3^2 - v_{S1}^2}} + \frac{H_1 v_{S1}}{\sqrt{v_3^2 - v_{S1}^2}} \right) \quad (4)$$

据宁夏区域地壳速度结构模型^[12]可知:上地壳厚 $H_1 = 27$ km,下地壳厚 $H_2 = 24$ km, $v_{S1} = 3.52$ km/s, $v_1 = 5.99$ km/s, $v_{S2} = 3.81$ km/s, $v_2 = 6.70$ km/s, $v_3 = 8.10$ km/s。将模型速度值代入式(3)、(4)可以得到:

震源在上地壳的深度公式为:

$$h = 2.72 \Delta t \quad (5)$$

震源在下地壳的深度公式为:

$$h = 27 + 3.17(\Delta t - 9.93) = 3.17 \Delta t - 4.48 \quad (6)$$

通过式(5)、(6)可知:当 $\Delta t \leq 9.93$ s 时,震源位于上地壳内,用式(5)进行计算;当 $18.75 \text{ s} \geq \Delta t > 9.93$ s,震源位于下地壳内,用式(6)进行计算;当震源深度超过 51 km 时,不能利用双层地壳结构模型进行计算^[5],因为宁夏地区地壳速度结构模型的莫霍面深度是 51 km。

sPn 波记录特征是:此波的振幅一般强于 Pn 波;如果初动清楚,此波与 Pn 波方向相反;一般情况下周期比 Pn 长^[13],振幅比 Pn 大;观测范围在 $\Delta < 1\,000$ km 内,我国大部分地区的台站基本都能比较清楚地记录到 sPn 震相^[13]。sPn 与 Pn 波的走时曲线相平行,随震中距变化极小,它们的到时差仅随震源深度的变化而增减。如有多台数据,则 sPn 与 Pn 的到时差通常为常量。

2 震源深度计算

宁夏地处纵贯我国南北的中枢大地震带——南北地震带的北段。在地质上,该段是祁连地槽褶皱系与华北地台的西部边缘接触形成的过渡带,并发育了一系列规模较大的活动断裂,地质状态不稳定,造成了宁夏地区具有地震发生频次高、强度大、灾害重的特点。

上溯 1000 年以来,宁夏地区发生过 14 次 6 级以上破坏性地震,其中有 5 次 7 级以上灾难性地震。1739 年发生的银川—平罗 8 级大地震瞬间使素有“塞上江南”之称的银川平原成为残垣断壁,死伤遍野;1920 年宁夏海原发生了举世震惊的 8½ 级大地震,造成了巨大的人间惨祸。据统计,宁夏历次地震造成的死亡人数累计达 30 万左右。

利用宁夏及邻省地震台网共 28 个台站的数字地震记录波形资料,采用 sPn 震相计算宁夏及邻近

地区 9 次 $M \geq 3.0$ 地震的震源深度^[4,14]。图 2 为台站与震中分布图。

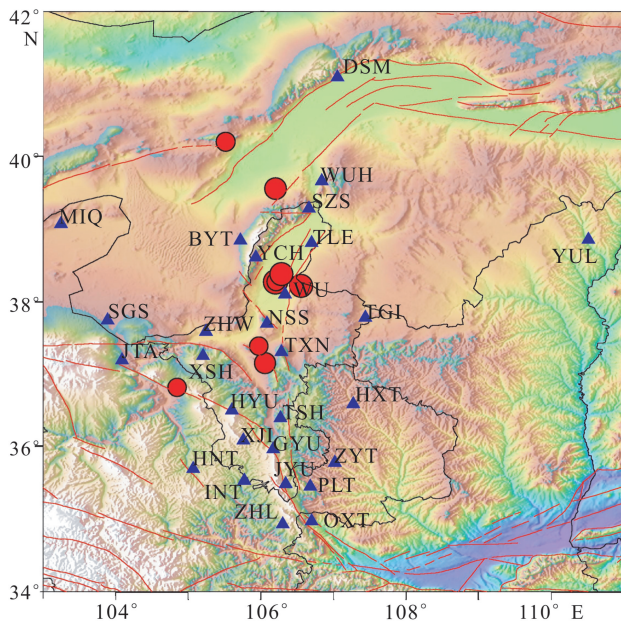


图 2 宁夏地区台站与震中分布图

Fig.2 Distribution of stations and epicenters in Ningxia area

首先根据 Pg 波和 Pn 波的走时方程,计算出 Pn 波先于 Pg 波到达的临界震中距 Δ_0 。因为当台站位置远小于 Δ_0 时,Pn 波完全被 Pg 波淹没,无法识别;当台站位置在 Δ_0 附近时,根据两种震相的动力学特征,通常 Pg 波初动起始较 Pn 波尖锐,振幅较 Pn 波大,所以 Pn 波也不容易识别;当台站位置大于临界震中距 Δ_0 时,Pn 已经作为初至震相可以直接读取。通过对宁夏台网记录的波形分析得到:宁夏地区的 Δ_0 大约为 220 km。sPn 波动力学特征保持着横波性质,其振幅和周期均大于纵波,最终以纵波形式出现在地震记录上,所以垂直方向显示清晰,其振幅和周期均大于 Pn,又由于与 Pn 同属于首波性质,其初动振幅较微弱。一般在震中距大于 250 km 时宁夏地区的 sPn 震相出现在 Pn 之后、Pg 之前。图 3 为 2010 年 6 月 22 日宁夏永宁 4.9 级地震固原地震台记录到的 Pn、sPn、Pg 震相的记录波形。

表 1 为 9 次地震的一些基本参数、sPn 计算深度。

从表 1 可知,根据 sPn 震相的判别依据,震中距由近到远。每个地震都选用 5 个以上台站的数字波形资料,震中距平均值为 251~458 km ($\Delta < 1\,000$ km); T_{sPn}/T_{Pn} 平均值为 1.28~1.78, sPn 周期大于 Pn 周期; A_{sPn}/A_{Pn} 均值为 1.34~3.53, sPn 振幅大于

表 1 地震参数及 sPn 计算深度

Table 1 Seismic parameters and calculation results of focal depth using SPn								
发震时刻	地点	震级/M	台站数	震中距均值/km	T_{sPn}/T_{Pn} 均值	A_{sPn}/A_{Pn} 均值	t_{sPn-Pn} 均值	深度均值/km
2009-05-28T22:04	宁夏同心	3.7	5	269	1.32	2.67	2.91	8
2009-06-25T04:07	内蒙古阿拉善左旗	3.9	8	458	1.28	1.74	3.53	9.5
2009-11-21T06:54	宁夏同心	4.2	5	287	1.41	1.34	2.65	7
2009-11-21T15:51	宁夏灵武、内蒙古鄂托克前旗交界	4.7	6	308	1.32	1.95	2.42	6.5
2010-06-22T16:46	宁夏永宁	4.9	7	320	1.65	2.53	2.36	6
2010-08-12T14:46	宁夏永宁	3.7	5	312	1.50	1.98	2.25	6
2011-12-27T02:46	甘肃平川	3.7	7	334	1.78	2.16	2.63	7
2012-11-20T10:24	宁夏永宁	4.6	7	320	1.67	2.34	2.34	6
2012-12-03T02:42	宁夏中宁	3.7	5	251	1.72	2.56	2.39	6

注： T_{sPn}/T_{Pn} 为周期比； A_{sPn}/A_{Pn} 为振幅比； t_{sPn-Pn} 为到时差。

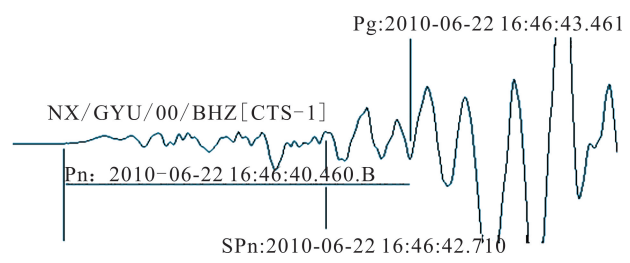


图 3 宁夏永宁 4.9 级地震的记录波形
Fig.3 The waveform of Yongning M4.9 earthquake in Ningxia

Pn 振幅。同时还可看到,各台站之间的周期比和振幅比偏差较大(原因可能是记录的信噪比较小,背景干扰相对较大,所以量取读数的误差相对较大,另外可能与台站附近的地质环境有一定关系)。但总的趋势仍可以反映出纵波和横波动力学特征的差别,就记录到的周期和振幅而言,sPn 均大于 Pn,这与理论特征相一致。9 次地震的到时差 t_{sPn-Pn} 平均值为 2.25~3.53 s,对应的震源深度为 6~9 km。

3 计算结果分析

sPn 方法的结果依赖于速度结构模型和震相读取的精度。速度结构模型选取关系到计算公式的正确与否,本文选取了《宁夏地区地震波走时表》中给出的速度结构模型,后期的人工地震测深、地壳深部结构研究^[8,15]等工作,也验证了此速度结构模型比较符合宁夏地区。因此各台的差别主要取决于 Pn 与 sPn 震相的准确分辨及读数的精度。因为这类性质波的震相,初始振幅一般情况下都比较微弱,所以读取到时如有 0.5~1 s 的相差,可能导致震源深度的计算结果有 ±1.5~3 km 的误差。

从表 1 可以看出这几次地震的震源深度均值约为 7 km。图 4 是利用宁夏速度结构模型计算出的震源深度为 7 km 的 Pn、Pb、sPn、Pg 理论走时曲线

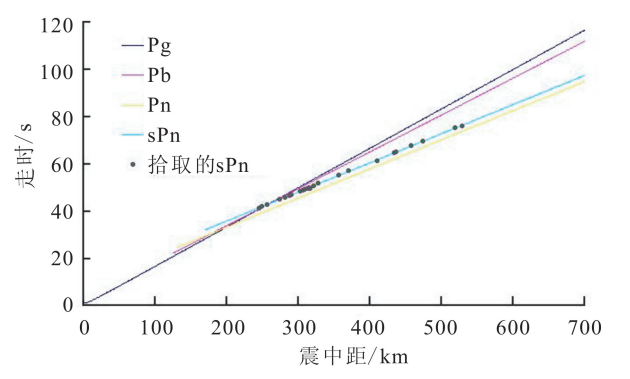


图 4 宁夏地区理论走时曲线图
Fig.4 Theoretical travel-time curves in Ningxia area

图。根据宁夏地区地震波走时表,在震源深度 5~10 km、震中距为 250 km 时,Pb 波与 Pg 波的到时差为 -0.1~0.1 s,在地震波形上两个震相几乎同时到达。由于两个震相各自的特征,Pb 震相较难识别。当震中距大于 250 km 时,虽然 Pb 震相也出现在 Pn 之后、Pg 之前,但从图 4 中可以看出,在相应的震中距拾取到的 sPn 震相到时点能大致落在 sPn 理论走时曲线上,说明拾取到的震相是 sPn 震相而非 Pb 震相,sPn 震相的识别是可信的。

4 结论

- 通过以上的分析研究可以得到如下结论:
- (1) 震源深度是地震时空参数中的一个基本参数,如果区域台网能够记录到 sPn 震相,并且能够准确地识别该震相,应用此方法就可以较为准确地计算出震源深度值。如果有多台记录到了 sPn 震相,取各台计算深度的平均值,就可以降低相对误差。
 - (2) 宁夏地区震中距大约在 220 km 时,Pn 作为初至震相;大于 250 km 时 sPn 震相出现在 Pn 震相之后、Pg 震相之前。

(3) 利用 sPn 震相计算近震($\Delta < 1\ 000\text{ km}$)的震源深度,如果各个台站 sPn—Pn 的到时差比较一致,就可以准确地计算此次地震的震源深度了。

参考文献(References)

- [1] 张诚.地震分析基础[M].北京:地震出版社,1986.
ZHANG Cheng.The Foundation of Seismic Analysis[M].Beijing:Seismological Press,1986.(in Chinese)
- [2] 修济刚,李友博.宽频带数字地震学观测与研究[M].北京:海洋出版社,1988.
XIU Ji-gang,LI You-bo.The Observation and Study of Broad-band Seismology[M].Beijing:China Ocean Press,1988.(in Chinese)
- [3] 高原,周慧兰,郑斯华,等.测定震源深度的意义的初步讨论[J].中国地震,1997,13(4):321-329.
GAO Yuan,ZHOU Hui-lan,ZHENG Si-hua,et al.Preliminary Discussion on Implication of Determination on Source Depth of Earthquake[J].Earthquake Research in China,1997,13(4):321-329.(in Chinese)
- [4] 房明山,杜安陆,董孝平,等.用 sPn 震相测定近震震源深度[J].地震地磁观测与研究,1995,16(5):13-18.
FANG Ming-shan,DU An-lu,DONG Xiao-ping,et al.Determination of Focal Depth with the sPn Phase[J].Seismological and Geomagnetic Observation and Research,1995,16(5):13-18.(in Chinese)
- [5] 高立新,刘芳,赵蒙生,等.用 sPn 震相计算震源深度的初步分析与应用[J].西北地震学报,2007,29(3):213-217.
GAO Li-xin,LIU Fang,ZHAO Meng-sheng,et al.Primary Analysis on the Seismic Source Depth Determination Using Spn Phase and Its Application[J].Northwestern Seismological Journal,2007,29(3):213-217.(in Chinese)
- [6] 任克新,邹立晔,刘端丰,等.用 sPn 计算内蒙地震的震源深度[J].地震地磁观测与研究,2014,25(3):24-31.
KEN Ke-xin,ZOU Li-ye,LIU Rui-feng,et al.Application of sPn to Focal Depth Determination in Inner Mongolia[J].Seismological and Geomagnetic Observation and Research,2014,25(3):24-31.(in Chinese)
- [7] 王登伟.用 sPn 与 Pn 波走时差测定近震震源深度的方法[J].地震,2011,31(1):12-19.
WANG Deng-wei.Determination Method of Local Earthquake Source Depth Using the Traveltime Difference of Pn and sPn [J].Earthquaked,2011,31(1):12-19.(in Chinese)
- [8] 杨明芝,马永青,廖玉华.宁夏地震活动与研究[M].北京:地震出版社,2007.
YANG Ming-zhi,MA He-qing,LIAO Yu-hua.Seismic Activity and Research of Ningxia[M].Beijing:Seismological Press,2007.(in Chinese)
- [9] 时振梁,张少泉,赵国荣,等.地震工作手册[M].北京:地震出版社,1992.
SHI Zhen-liang,ZHANG Shao-quan,ZHAO Guo-rong,et al.The Working Manual of Earthquake[M].Beijing:Seismological Press,1992.(in Chinese)
- [10] 张少泉.地震波分析与应用[M].北京:地震出版社,1998.
ZHANG Shao-quan.The Analysis and Application of Earthquake Wave[M].Beijing:Seismological Press,1998.(in Chinese)
- [11] 库尔哈奈克.地震图解析[M].北京:地震出版社,1990.
KU E H N K.The Analytic of Seismic Map[M].Beijing:Seismological Press,1990.(in Chinese)
- [12] 王绒霞.宁夏地区地震波走时表[M].银川:宁夏回族自治区地震局,1985.
WANG Rong-xia.The Travel Time Table of Ningxia Earthquake Waves[M].Yinchuan:Earthquake Administration of Ningxia Hui Autonomous Region,1985.(in Chinese)
- [13] 国家地震局科技监测司.中国分区地震走时表的研制[M].北京:地震出版社,1989.
Department of Science, Technology, and Monitoring, State Seismological Bureau. The Developpment of Earthquake Travel Timetable of China Partition[M].Beijing:Seismological Press,1989.(in Chinese)
- [14] 魏娅玲,蔡一川,苏金蓉.采用 sPn 震相确定甘肃岷县 $M > 4.0$ 地震震源深度[J].工程地震学报,2013,35(3):438-442.
WEI Ya-ling,CAI Yi-chuan,SU Jin-rong.Calculation of the Focal Depth of $M > 4.0$ Earthquakes in Minxian,Gansu,Based on sPn Seismic Phases[J].China Earthquake Engineering Journal,2013,35(3):438-442.(in Chinese)
- [15] 谢晓峰,王伟涛,崔瑾,等.宁夏及邻区地壳上地幔结构特征分析[J].工程地震学报,2014,36(2):309-313.
XIE Xiao-feng,WANG Wei-tao,CUI Jin,et al.Analysis of Crust and Upper Mantle Structure in Ningxia and its Adjacent Area[J].China Earthquake Engineering Journal,2014,36(2):309-313.(in Chinese)