

# Research in the Trend of Ground Rupture Development in Gaoliying of Beijing Based on the Variation of the S Wave Velocities

Shuai Zhao, Yongqi Meng, Jiajun Sun

Beijing Earthquake Administration, Beijing  
Email: zhaoshuai@bjseis.gov.cn

Received: Oct. 26<sup>th</sup>, 2018; accepted: Nov. 8<sup>th</sup>, 2018; published: Nov. 19<sup>th</sup>, 2018

---

## Abstract

Gaoliying is one of the regions in Beijing with high risks of ground rupture disasters. During the Tenth-Five-Year Regulation, the Beijing Earthquake Administration has developed a lot of research in Gaoliying ground rupture activity region and has characterized the North-East trend activity based on the ground rupture field work. This article processed the drilling data, the multi-channel analysis of surface waves (MASW) method, the refraction tomography data in different collection time, and obtained the S-wave velocities from different methods. By analyzing the S-wave velocity features, the north-trend activity of the Gaoliying ground ruptures from 2004 to 2017 was inferred.

## Keywords

Ground Rupture, Huangzhuang-Gaoliying Fault, Comprehensive Geophysics Detection

---

# 基于S波波速变化的北京市高丽营地区地裂缝发展趋势研究

赵 帅, 孟勇琦, 孙佳璐

北京市地震局, 北京  
Email: zhaoshuai@bjseis.gov.cn

收稿日期: 2018年10月26日; 录用日期: 2018年11月8日; 发布日期: 2018年11月19日

---

## 摘 要

北京高丽营镇是北京地区地裂缝灾害高发的区域之一, “十五”以来, 北京市地震局在高丽营地区地裂

缝活动区开展了大量的工作,并根据期间地表破裂现象的现场调查得出了地裂缝北东向活动的认识。本文对北京顺义高丽营地区不同时期单孔法、瞬态多道瑞雷波法及折射走时层析成像数据进行了处理,分别提取测井及折射走时层析成像(Tomography)中的剪切波(S波)速,并通过转换得到瞬态多道瑞雷波法(MASW)的剪切波速后,对剪切波速度特征进行分析。分析结果印证了该地区2004年至2017年间地裂缝北向活动的认识。

## 关键词

地裂缝, 黄庄 - 高丽营断裂, 综合地球物理勘探

Copyright © 2018 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

地裂缝是一种与地震、地质灾害紧密相关的浅表地质现象,地裂缝发育的地区会导致各类建筑物开裂,路面破坏,及地下管网错段,对区域人民的生命财产安全和经济发展产生严重威胁。城市范围内发育的地裂缝成因复杂多样,断裂活动、水的作用和部分人类活动是导致地面开裂的主要原因。

本研究所处黄庄高丽营镇受黄庄 - 高丽营断裂活动和地下水沉降等因素影响,地裂缝高度发育。“十五期间”,北京市地震局在研究区南部唐自头、土沟、西王路等村庄进行了大量的野外现场调查工作,并通过槽探、钻探、地球物理探测等方法对上述地区的地裂缝现象及断裂活动相关性进行了详细的研究工作[1][2]。随着地裂缝的活动,沿西王路村地裂缝北东走向1公里处的房屋和路面也陆续出现了破坏的状况,该现象的出现表明,高丽营镇地裂缝在过去的十多年期间还在持续向北东方向发展。本文收集了2005~2017年新出现地裂缝区域范围内的单孔法、瞬态多道瑞雷波法及折射走时层析成像数据,并尝试通过分析过去14年间浅部剪切波速结构的变化趋势来印证高丽营镇地裂缝的北东向活动。

## 2. 地质构造和概况

研究区在构造上处于北京拗陷的北端,地貌单元属于冲洪积平原地貌,地势较为平坦。研究区附近河流较多,主要有清河、沙河、温榆河,在平原区内受构造影响河道曾发生多次变迁。根据现场地质调查及钻探结果,研究区主要出露的地层为:第四系全新统(Qh)灰黄色、黄灰色粉砂、粉砂质粘土,上更新统(Qp3)灰色细砂层夹有粘土与粉砂薄层和少量的灰黄色粉砂、粘土,中更新(Qp2)统灰色、灰绿色、灰黄色粉粘土、粉质粘土互层。

研究区内通过黄庄 - 高丽营断裂的庙城 - 高丽营段(图1),最新活动年代可能为晚更新世至全新世,断裂长40 km,走向北北东,倾向南东,构成控制700~800 m深的顺义第四纪断陷盆地的北边界,断裂走向NNE-NE,倾向南东,倾角55°~75°,断裂主要表现为正断倾滑性质,并在唐自头、土沟、西王路等村庄浅层地表发育斜列状地裂缝[3][4][5]。

为了调查该段区域断裂活动及地裂缝特征,北京市地震局曾于“十五期间”围绕黄庄 - 高丽营断裂开展了专题研究,产出了丰富的地质及地球物理勘探数据,2016~2017年间,北京市地震局在西王路村北东方向的新生地裂缝位置继续补充了地球物理勘探线,此次研究所采用数据方法在研究区的分布情况如图2所示:

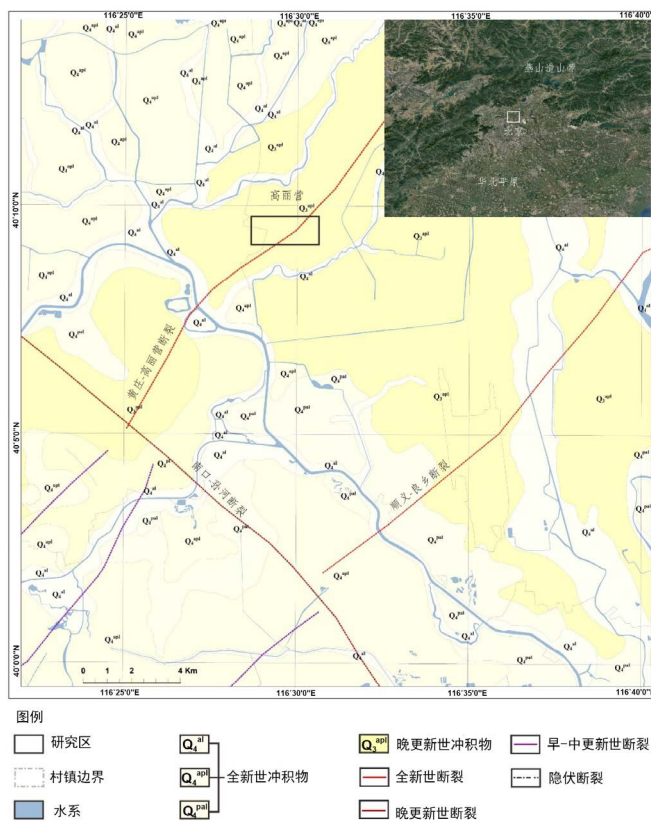


Figure 1. The geological map of researching area  
图 1. 研究区地质构造图



Figure 2. The distribution of different methods  
图 2. 研究方法及其位置分布图

### 3. 数据及原理

地震震害主要由地震 S 波(横波)造成,而沉积层的 S 波速度结构在地震区划、工程地震、活动断层探测、结构抗震、震害预测、地震应急救援及资源勘察中有着非常重要的作用[6]。同时,浅层 S 波的波速基本上不受含水量变化影响,其速度只是由于密度变化所致[7] [8]。根据北京市地震局在研究区及附近探槽施工经验,高丽营地区近地表受上层滞水和较浅的潜水水位影响,地层水饱和程度较高。这就意味着此次研究可以最大程度的减少不同年份降水及地下水变化造成的速度差异,而剪切波速的变化可以更多的考虑来自于地层密度变化的影响[9] [10] [11]。

本研究考虑到单孔法剪切波速测试对于极浅层(0~10 m)测试精度的局限性和 MASW 方法、层析成像方法探测深度的限制(小于 20 m),剪切波速的提取将限定在地下 10 m~20 m 的区间[12]。

#### 3.1. 单孔法剪切波速测试

Table 1. Results of drilling shear wave velocity tests

表 1. 单孔法剪切波速测试结果

ZK1 反应分析计算剖面					ZK2 反应分析计算剖面				
土层序号	土类类号	土类名称	层厚 (m)	波速 (m/s)	土层序号	土类类号	土类名称	层厚	波速
1	1	回填土	4.6	186	1	1	回填土	4.8	183
2	4	砂质粉土	1.9	231	2	4	砂质粉土	3.2	198
3	2	粘质粉土	1.2	208	3	2	粉质黏土	2	203
4	3	粘质粉土	6.3	237	4	5	粘质粉土	5.5	240
5	2	粘质粉土	6.8	272	5	4	砂质粉土	5.3	281

钻孔剪切波速测试开展于 2005 年,整套系统由 CJ-84A-1 型靠壁式三分量井下地震检波器和 SWS II 型工程勘探与检测仪组成。测试深度 110 米。测试使用单孔检层法,沿地表敲击激震板作震源,井下贴壁探头接收剪切波并通过电缆送到地面进行数据采集。

由于靠壁式剪切波速测试方法在探测精度和 S 波激发特征的局限性,测试所得 S 波速度均存在一定的跳跃误差,根据两钻孔的波速对比,发现误差的变化范围约为 $\pm 10\%$  [13]。根据测试结果(表 1)可知,两个钻孔的 S 波速度在地下 10~20 m 范围内均为约 230~280 m/s,  $\pm 25$  m/s。

#### 3.2. 瞬态多道瑞雷波法

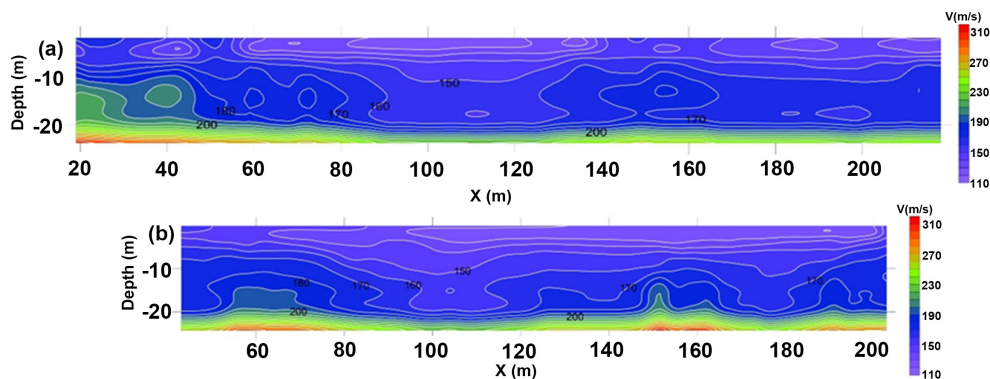


Figure 3. The MASW method profiles

图 3. 瞬态多道瑞雷波法剖面



MASW 方法探测数据采集于 2016 年, 测线长度分别为 190 m (Line 1) 和 150 m (Line 2), 使用 30 kg 的落重震源, 24 道 4 Hz 检波器, 道间距为 2 m。将获取到的面波时程曲线原始记录进行分析解释, 划分地层层位求解厚度并计算各层瑞雷波速度, 然后由求得瑞雷波速度后, 按公式(1)计算相应地层的 S 波速度。

$$V_R = \frac{0.87 + 1.12\mu}{1 + \mu} V_S \quad (1)$$

式中,  $\mu$  为泊松比,  $V_R$  为瑞雷波速度,  $V_S$  为 S 波速度。

由于第四系地层的泊松比一般为 0.37~0.49, 故  $V_R = (0.938\sim 0.954) V_S$ , 可以认为对土体而言,  $V_R$  与  $V_S$  基本相等, 计算误差约为 5% [14]。

从 L1 线(图 3(a))面波速度反演剖面图可以看出, 从宏观上, 场地内横波波速自浅至深逐渐增大, 可以大致分为 3 层。第一层横波速度在 100~150 m/s, 厚度约为 5 m, 以横坐标 85 m 为界, 以右厚度变大; 第二层横波速度在 150~200 m/s, 厚度约为 15 m; 第三层横波速度大于 200 m/s, 密实度加大。从 L2 线(图 3(b))面波速度反演剖面图可以看出, 从宏观上, 场地内横波波速自浅至深逐渐增大, 可以大致分为 3 层。第一层横波速度在 100~150 m/s, 厚度约为 5 m, 以横坐标 85 m 为界, 以右厚度变大; 第二层横波速度在 150~200 m/s, 厚度约为 15 m; 第三层横波速度大于 200 m/s, 土层密实度进一步加大。

综合对比 Line 1 和 Line 2 剖面可以发现, 两条测线的纵向速度结构变化趋势较为一致, 尤其是  $V_S = 200$  m/s 的速度层均处于约 -20 m 的深度范围。

### 3.3. 折射走时层析成像

S 波层析成像探测工作开展于 2017 年, 现场布设两条测线, 长度均为 90 m, 采用 10 KG 锤击震源和 4 Hz 横波检波器, 道间距 2 m, 根据现场测试的 S 波折射初至到时反演出 S 波速度结构(图 4)。

Line 3 线(图 4(a))场地内横波波速自浅至深逐渐增大, S 波速度结构大致可分为三层, 第一层横波速度在 100~170 m/s, 厚度约为 8 m, 横向速度变化较均匀; 第二层横波速度在 170~200 m/s, 厚度约为 7 m; 第三层横波速度大于 200 m/s。Line 4 线(图 4(b)) S 波速度结构大致可分为四层, 第一层横波速度在 100~160 m/s, 厚度约为 7 m, 第二层横波速度在 160~200 m/s, 厚度约为 5~7 m; 第三层横波速度 200 m/s~300 m/s, 厚度约 9 m; 第四层横波速度大于 300 m/s, 横向速度结构较均匀。

综合对比 Line 3 和 Line 4 线速度结构可知, 两个剖面中  $V_S = 200$  m/s 的速度层均出现在地下 12~15 m 位置, 而 Line 4 测线在地下 15~25 m 位置的 S 波速度大于 Line 3, 比较两条测线的布设位置和间距(约 430 m), 可以推测两条测线速度结构所体现出的地下介质密度由南往北出现了一定程度上的变化。

## 4. S 波速度结构特征分析

### 4.1. S 波速度特征

本文提取了单孔法剪切波速以及 MASW 方法和层析成像方法中与新生地裂缝位置或地裂缝走向线位置重合处的 S 波速度, 通过对比各方法在地下 10~20 m 区间的地层速度, 来分析 S 波在时间尺度上(2005 年~2017 年)的变化趋势。

如图 5 所示, 通过各方法 S 波速度对比发现, MASW 方法和层析成像方法在地下 10~15 m 的 S 波速度比较单孔法的速度差别较大, 可达 50~80 m/s, 可以体现出 2005 年至 2017 年该深度介质密度变小; MASW 方法和层析成像探测在地下 15~20 m 深度的速度变化差别较为明显, 而层析成像的 Line 3 和 Line 4 在该深度也有着 30~40 m/s 左右的差别, 综合考虑 MASW 方法和层析成像探测的四条测线距离可以发现, S 波速度变化趋势从西南(MASW 方法 Line 1)到东北(层析成像 Line 4)由 170 m/s~200 m/s 增加到 180 m/s~260 m/s, 反映出地层介质密度随着距离的增加而增大。

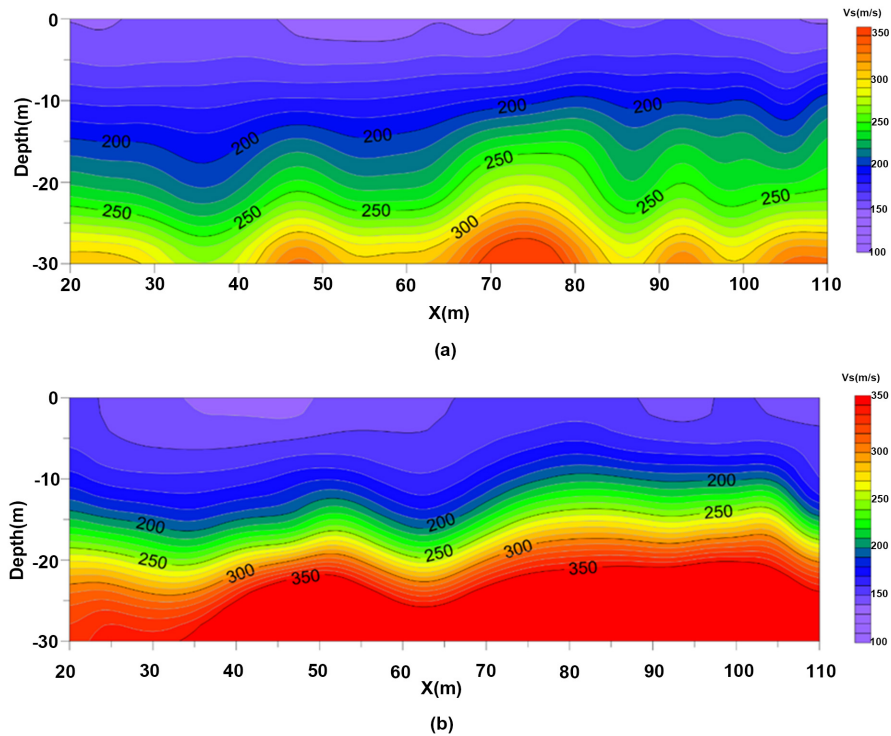


Figure 4. The refraction tomography profiles  
图 4. 折射走时层析成像剖面

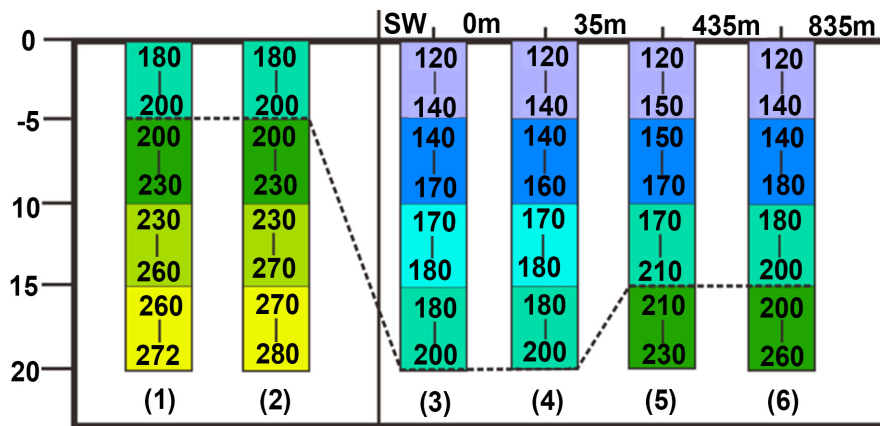


Figure 5. Comparison of the S-wave velocities between different methods, (1) ZK1 drilling result in 2005; (2) ZK2 drilling result in 2005; (3) The MASW Line 1 in 2016; (4) The MASW Line 2 in 2016; (5) The tomography Line 3 in 2017; (6) The tomography Line 4 in 2017

图 5. 各方法 S 波速度对比, (1) 2005 年单孔法 ZK1; (2) 2005 年单孔法 ZK2; (3) 2016 年 MASW 法 Line 1; (4) 2016 年 MASW 法 Line 2; (5) 2017 年层析成像 Line 3; (6) 2017 年层析成像 Line 4

#### 4.2. 地裂缝活动相关性

高丽营镇及周边区域是北京地区地裂缝发育较为严重的区域之一, 从 2004 年至今, 造成大量建筑物和道路的损坏。通过在不同时期布置在地裂缝延伸方向上的各种地球物理探测手段结果可以很好的印证了地裂缝在该地区的活动。在 2005 年单孔法测试阶段, 测试场地所在的北六环以北区域并未在地表发现

明显的地裂缝及建筑物破坏情况,所以单孔法剪切波速的 S 波速度结构可以理解为未发生地裂缝或者地裂缝埋深较深、未破裂至地表的浅层 S 波速度结构。而在 2016 年 MASW 方法施工阶段,测试场地已经发育大量的地裂缝以及相应造成的建筑物损坏及道路破坏现象,在该阶段测试得到的 S 波速度结构可以理解为已发生带裂缝的浅层 S 波速度结构,并且该速度结构和地裂缝北东向地表破裂边界在 2017 年层析成像探测工作中进行了重新验证,可以发现地裂缝虽然在场址以北的区域继续延伸,但是随着测线的北东向布设,到达 Line 4 的位置时, S 波速度结构已经与 Line 1 和 Line 2 的速度结构产生较大变化,尤其在地下 20 米左右深度的 S 波速度结构特征已经与 2004 年单孔法剪切波速的测试在该深度速度结构较为一致,表明地裂缝在通过该段位置时的埋深位置较深,而根据现场调查, Line 4 位置附近确实未发现地裂缝发育痕迹以及建筑物、道路破坏现象,这从一定程度上印证了此次研究的结果。

关于新生地裂缝与“十五期间”研究区南部唐自头、土沟、西王路等地区出现的地裂缝在空间上的相互关系也可以通过 MASW 方法和层析成像方法进行相关性的分析,由于研究区在 2016 年测试时已产生地表裂缝,根据地裂缝破裂处 MASW 方法 Line 1 和 Line 2 以及层析成像探测 Line 3 的处理结果可以发现,新生地裂缝的走向北东,倾向东南,与研究区南部“十五”期间发现的地裂缝在空间特征上较为一致。从现有研究成果上判断,研究区新生地裂缝与研究区南部地裂缝具有很强的相关性,可以考虑为“十五”以来,研究区南部唐自头、土沟、西王路地裂缝北东向进一步发展的表现。而新生地裂缝与黄庄-高丽营断裂除走向和倾向的一致性较高以外,在空间上的相关性还需要进一步的研究加以印证。

## 5. 结论

通过对研究区 2005~2017 年新出现地裂缝区域范围内的单孔法、瞬态多道瑞雷波法及折射走时层析成像数据进行分析后认为,研究区浅层 S 波速度结构从 2005 年至 2017 年在地下 10~20 m 区间变小,体现出地层介质密度在时间上的变化趋势。同时,研究区西南和东北区域地下 20 m 左右深度的 S 波速度变化差别较为明显,体现出地层密度在空间上的差异性发展。结合现场调查及 MASW 方法和层析成像探测结果分析,研究区密度变化与地裂缝在该地区的发育有密切关系,新生地裂缝的空间特征与“十五”期间,研究区南部唐自头、土沟、西王路地裂缝特征较为一致,可以认为是南部地裂缝区域在近 10 多年沿地裂缝北东走向持续活动的结果。而新生地裂缝与黄庄-高丽营断裂活动的相关性判定还需进一步的研究。

## 参考文献

- [1] 张世民,王丹丹,刘旭东,张国宏,赵俊香,罗明辉,任俊杰,王瑞,张英礼.北京南口-孙河断裂晚第四纪古地震事件的钻孔剖面对比与分析[J].中国科学(D辑:地球科学),2008(7):881-895.
- [2] 胡平,罗华春,孟勇琦,白立新,王湘南.从顺义地表破裂带分析顺义-良乡断裂北段的活动性[J].地震地质,2000,22(2):123-128.
- [3] 张磊,张晓亮,白凌燕,杨天水,蔡向民,梁亚南.北京地区黄庄-高丽营断裂北段活动性研究与灾害效应分析[J].地质力学学报,2017,23(4):548-557.
- [4] 蔡向民,黄淇,张磊,白凌燕.北京温榆河的成因[J].中国地质,2014,41(5):1515-1521.
- [5] 贾三满,刘明坤,田芳,赵守生.北京地区地裂缝分类及防治措施[J].城市地质,2011,6(2):4-7+24.
- [6] 何海兵,李清河,范小平.由微振动记录用剥层法研究浅层 S 波速度结构[J].防灾减灾工程学报,2010,30(1):103-108.
- [7] 蔡袁强,徐长节,吴世明.粘弹性饱水岩层中地震波的传播[J].地震学报,1998(3):27-31.
- [8] 李光泉,李伟东,叶林,等.多孔介质中水位变化对波形、波速和波谱影响的实验研究[J].地震研究,2001,24(1):65-72.
- [9] 朱广生,桂志先,熊新斌,等.密度与纵横波速度关系[J].地球物理学报,1995(a01):260-264.

- [10] 汪丽. 地表水与地裂缝活动关系的现场试验研究[D]: [硕士学位论文]. 长安: 长安大学, 2006.
- [11] 徐长节, 马晓华, 蔡袁强. 粘弹性准饱水岩层中地震波的传播[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(14): 2490-2496.
- [12] 鹿子林, 付海清, 胡超, 等. 钻孔剪切波速测试两种方法的对比[J]. 华北地震科学, 2014, 32(2): 45-49.
- [13] 玄月, 吴涛, 刘轩, 等. 北京市浅层剪切波速与隐伏构造关系研究[J]. 华北地震科学, 2014, 32(2): 25-28..
- [14] 苏向前, 刘康和. 面波法与单孔检层法波速测试的工程应用[J]. 长江工程职业技术学院学报, 2006, 23(3): 1-5.

**知网检索的两种方式:**

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>  
下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2163-3967, 即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>  
左侧“国际文献总库”进入, 输入文章标题, 即可查询

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>  
期刊邮箱: [ag@hanspub.org](mailto:ag@hanspub.org)