

## TRT 地质超前预报技术在矿山中的应用探讨

孙天学,陈遵义,郝进喜,郭振华  
(五矿邯邢矿业有限公司,河北 邯郸 056002)

**摘 要** 阐述了 TRT 地质超前预报技术的工作原理及技术特点,介绍了该技术的探测方法。根据具体工程,利用钻探分别对 TRT 探测的异常区进行了验证,论述了 TRT 地质超前预报技术在矿山实际探测中应注意的问题,分析了预报失败的原因,提出了其中存在的问题及下一步改进的意见。

**关键词** :TRT 地质超前预报技术;工作原理;探测方法;矿山应用

## DISCUSSION ON THE APPLICATION OF TRUE REFLECTION TOMOGRAPHY FOR GEOLOGICAL PREDICTION IN MINES

SUN Tian-xue, CHEN Zun-yi, HAO Jin-xi, GUO Zhen-hua  
(Hanxing Mining Co., Ltd., China Minmetals Corporation, Handan 056002, Hebei Province, China)

**Abstract** : The operational principle, technical features and detecting method of true reflection tomography (TRT) for geological prediction are introduced. For a case project, the TRT detected anomalous zone is verified by drilling. With discussion on the issues about detection by TRT technology in mine, reasons for the failures of prediction are analyzed, and suggestions for the improvement are put forward.

**Key words** : TRT geological prediction technology; operational principle; detection method; application in mine

我国经济的发展也加快了对矿山资源的开采步伐。但是由于许多老矿山经过多年开采,资源日趋紧张,探采深部资源迫在眉睫。由于深部地质条件相对复杂,矿山在探采深部资源的同时,也面临着严峻的安全问题,如突水、冒顶等。为了防止安全事故的发生,TRT(True Reflection Tomography)地质超前预报技术被引用到了矿山<sup>[1-2]</sup>。

目前,TRT 地质超前预报技术主要应用于公路隧道的施工中,在预报溶洞、断层破碎带、复杂地层条件等方面也有许多成功的实例,得到了业内人士的认可<sup>[3]</sup>。在矿山应用方面,如何利用好 TRT 地质超前预报技术,使其在预报不良地质体、不明采空区等方面发挥重要作用,这是值得探讨的问题。

### 1 TRT 地质超前预报工作原理及特点

收稿日期 2012-09-17,修回日期 2012-11-14。编辑 李兰英。

作者简介:孙天学(1982—),男,地质工程师,在读硕士,主要从事地质矿产研究工作。通信地址 河北省邯郸市中华大街 74 号。

#### 1.1 TRT 地质超前预报技术工作原理

TRT 系统的工作原理基于地震波(弹性波)的反射原理,当弹性波遇到声学阻抗差异(即岩石波阻抗,为岩石密度和纵波波速的乘积)界面时,一部分信号被反射回来,另一部分信号透射进入前方介质。声学阻抗的变化通常发生在地质岩层界面或岩体内不连续界面。反射的地震信号被高灵敏度地震信号传感器接收,通过分析,被用来了解隧道工作面前方地质体的性质(软弱带、破碎带、断层、含水等)、位置及规模。正常入射到边界的反射系数计算公式如下:

$$R = \frac{\rho_2 V_2 - \rho_1 V_1}{\rho_2 V_2 + \rho_1 V_1}$$

$R$  为反射系数, $\rho_1$ 、 $\rho_2$  为岩层的密度; $V_1$ 、 $V_2$  为地震波在岩层中的传播速度。地震波从一种低阻抗物质传播到高阻抗物质时,反射系数是正的;反之,反射系数是负

的. 因此, 当地震波从软性地质体传播到硬质地质体时, 回波的偏转极性和波源是一致的. 当岩体内部有破裂带时, 回波的极性会反转. 反射体的尺寸越大, 声学阻抗差别越大, 反射波就越明显, 越容易被探测到.

### 1.2 TRT 地质超前预报技术特点

#### (1)操作简便, 成本低

传感器和地震波采集、处理器之间采用无线连接, 大大简化了装备. 使用锤击作为震源, 可重复利用, 不需要耗材.

#### (2)采集信息全面、直观

采用三维数据处理, 实现了三维空间观测, 可以清楚直观地反映地质体异常情况, 能更有效地对反射异常区域进行识别与解释.

## 2 TRT 地质超前预报技术的探测方法

### 2.1 仪器设备

专用便携式计算机、基站、带触发器的锤子、传感器、无线模块及配套设备、测量仪器等.

### 2.2 探测方法

TRT 地质超前预报技术的探测方法可简要概括为: 一点激发, 多点接收, 然后多次重复该过程在不同的位置激发地震波, 得到多组地震波传播数据. 操作人员运用专业运算程序对其进行数据处理, 得到三维空间分布的反射能量图像. 具体探测方法如下.

#### (1)震源点及传感器的布置

震源点一般布设在靠近掌子面巷道的两帮上, 震源点及传感器在巷道的布置(见图 1)要求最高与最低位置传感器的差值必须大于 2.5 m.

#### (2)无线传输模块的安装

操作人员安装传感器及无线传输模块. 测量人员

测量震源点与传感器点绝对坐标(大地坐标)或者相对坐标, 精度一般要求精确到 10 cm 内.

(3)建立基站, 连接计算机, 初始化采集程序, 进行数据采集

对设备正确连接后, 打开计算机, 运行采集程序, 开始工作. 原则要求每个传感器及无线传输模块都运行正常才开展预报工作.

#### (4)震源激发

TRT 使用重锤锤击指定的震源点激发地震波, 同一组锤击的位置不可改变. 锤击触发时必须用力锤击震源点, 一次激发成功, 才能获得最佳的弹性波传播能量.

#### (5)数据处理

该操作一般在室内完成. 把现场采集到的地震波数据导入专业数据处理软件, 进行数据处理.

## 3 TRT 与钻探成果验证对比分析

钻探技术是获得地下蕴藏的真实地质资料和直接信息的一种技术. 通过钻探可对所取得的地质和矿产资源参数作出评价<sup>[4]</sup>. 为了分析 TRT 地质超前预报技术的精确度, 笔者将钻探成果与 TRT 探测成果进行对比分析, 以验证探测成果的可靠性.

### 3.1 TRT 地质超前预报不明采空区

矿区施工的某沿脉巷, 巷道围岩岩性为闪长岩, 岩石裂隙不发育, 顶板岩体的稳定性较好.

#### (1)TRT 探测成果

利用 TRT6000 型地质超前预报系统进行探测. 探测结果(图 2) 前方存在两处低阻区, 岩体较为破碎, 裂隙水可能较为发育. 0~35 m 处, 左侧岩体张性裂隙较发育, 岩体较为破碎; 50~57 m 处左侧标高-6 ~ -20 m 存在明显低阻区, 相对掌子面高-35 ~ -15 m. 推测第一处异常为闪长岩裂隙含水带. 第二处异常为采空区或采矿工程(斜井).

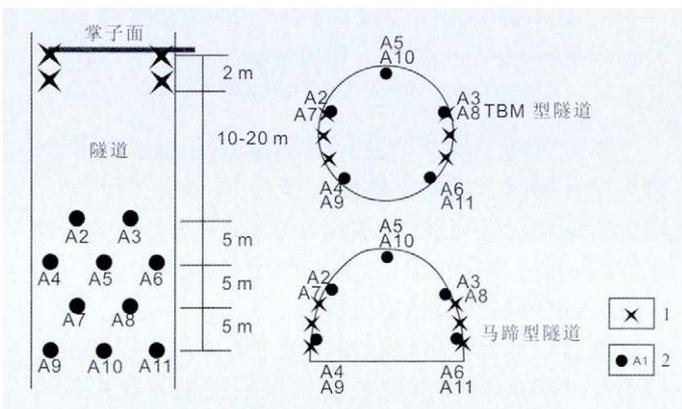


图 1 TRT6000 震源及传感器布置图

Fig. 1 Schematic diagram of the seismic source and sensor layout of TRT6000

1—震源点(seismic source) 2—传感器(无线)(sensor)

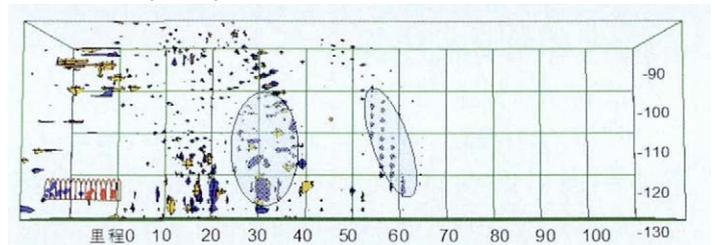


图 2 TRT 探测结果示意图(侧视)

Fig. 2 Schematic diagram of the detection results of TRT (side view)

(2)TRT 与钻探成果验证对比分析

巷道继续掘进 20 m 后在掌子面施工验证孔 3 个 (图 3),依次编号为 TSA1、TSA2 和 TSA3,总工程量为 197.89 m. 钻孔及巷道揭露岩性主要为闪长岩,岩体较完整,3 个钻孔均未出水.

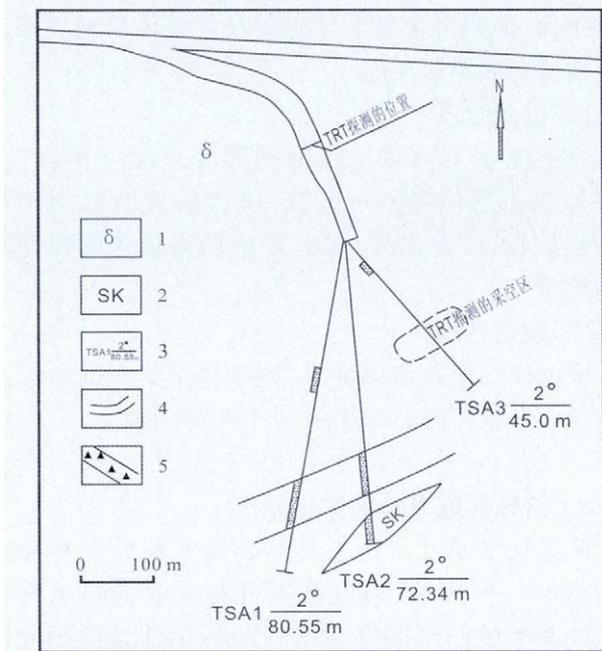


图 3 综合成果对比分析示意图

Fig. 3 Schematic diagram of comparative analysis

1—闪长岩(diorite) 2—夕卡岩(skarn) 3—孔号/倾角/孔深(hole code/dipping angle/depth) ;4—已施工巷道(worked tunnel) ;5—破碎带(fracture zone)

施工的 3 个钻孔,共揭露岩层破碎段 5 个,钻孔 TSA1 (孔深 58.00~70.00 m) 和 TSA2 (孔深 50.22~60.75 m)控制的破碎带具有明显的走向. TSA2 揭露的夕卡岩(孔深 65.20~72.34 m)强度极低,推测走向与闪长岩破碎带走向基本一致. 施工的 3 个钻孔均未揭露不明民采空区和采矿工程(斜井).

综上所述,TRT 探测成果与钻探成果存在较大差异.

3.2 TRT 地质超前预报不良地质体

矿区施工的某沿脉巷,巷道围岩岩性为闪长岩,岩石裂隙发育,顶板股状淋水.

(1)TRT 探测成果

利用 TRT6000 型地质超前预报系统进行探测. 探测结果(图 4):从传感器到震源点处左下角岩体较为破碎,震源点前方 0~57 m 岩体较为破碎. 其中 39~55 m 处及标高-98~-115 m 处低阻抗较为明显. 推测-100 m 水平围岩整体非常破碎,裂隙含水量大,前方 39~55 m 处低阻异常,可能为含水软弱体.

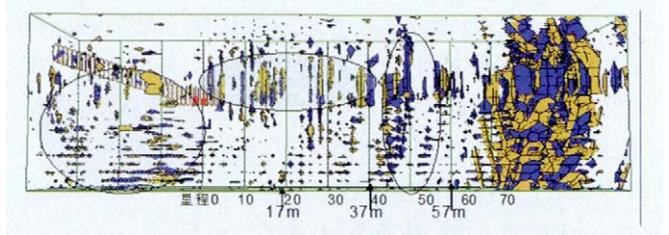


图 4 TRT 探测结果示意图(侧视)

Fig. 4 Schematic diagram of the detection results of TRT (side view)

(2)TRT 与钻探成果验证对比分析

本位置共施工验证孔 3 个 (图 5),依次编号为 TSO3、TSO4 和 TSO5,总工程量为 243.0 m. 钻孔揭露岩性均为闪长岩,岩层较破碎,出水量最大的钻孔为 TSO5,终孔实测涌水量  $Q=14.84 \text{ m}^3/\text{h}$ ,水压  $P=0.1 \text{ MPa}$ . 其他钻孔涌水量和水压均较小.

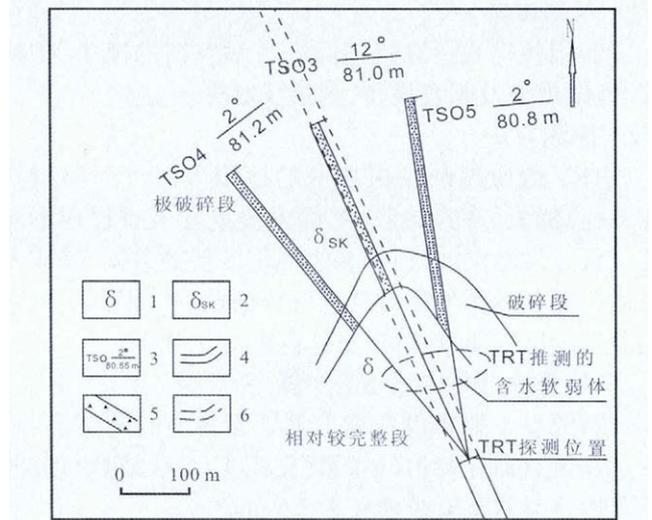


图 5 综合成果对比分析示意图

Fig. 5 Schematic diagram of comparative analysis

1—闪长岩(diorite) 2—夕卡岩(skarn) ;3—孔号/倾角/孔深(hole code/dipping angle/depth) ;4—已施工巷道(worked tunnel) ;5—破碎带(fracture zone) ;6—设计巷道(designed tunnel)

本位置施工的 3 个钻孔,共揭露岩层破碎段 7 个. 根据钻孔揭露岩层的完整性,把闪长岩分为 3 段:第一段为岩层相对较完整段,该段出水较小;第二段为岩层破碎段,岩层稳定性差,含有一定的裂隙水;第三段为岩层蚀变段,岩层稳定性极差.

通过对比分析可以看出,对于第二段岩层和第三段岩层 TRT6000 型地质超前预报系统推测成果没有反映.

4 TRT 预报失败原因分析及建议

4.1 TRT 预报失败原因分析

### (1) TRT 预报不明空区失败原因

从综合成果对比分析图(图 3)上可以看出,现场测试的巷道腰线呈弧线,即巷道腰线(从掌子面后退算起)的直线距离小于 27 m,也就是说震源和检波器不全在同一条直线上。根据地震反射波基本理论可知,只有在波阻抗不相等的条件下,地震波才会发生反射,其差别越大,反射波能量越强。只有当检波器与反射界面成垂直夹角时,反射波更易被接收且接收的反射波振幅能量最大,在实际操作中只有当检波器与震源呈直线布置时效果最佳,也就要求巷道腰线(从掌子面后退算起)要有一定的直线距离。由于震源和检波器呈弧线布置,锤击产生的地震反射波并不是直接被检波器接收,而反射波要再经巷道围岩界面的多次反射才能被接收,这就增加了地震波在地层中能量的损耗,从而削弱了反射波振幅能量,影响了采集数据的质量,导致预报的偏差较大。

### (2) TRT 预报不良地质体失败原因

根据钻孔揭露岩层的完整性,把闪长岩分为 3 段:第一段为岩层相对较完整段;第二段为岩层破碎段;第三段为岩层蚀变段。根据地震反射波基本理论可知,反射波的振幅与反射界面的反射系数有关,当入射波振幅一定时,反射波振幅与反射系数成正比,而反射系数与反射界面两侧的密度和速度的乘积(波阻抗)与入射角度有关。由于这 3 段岩层的波阻抗(即密度和速度的乘积)是呈递减的,代入 TRT 地质超前预报技术工作原理公式可知,反射系数  $R$  为负值,因而反射波在 3 段岩层中振幅能呈依次递减,地震反射波信号越来越弱,而检波器接收的信号更多为其他干扰信号(如面波、声波等),影响了采集数据的质量,从而导致在探测区域范围内,探测成果与钻探实际揭露存在较大偏差。

### 4.2 消除部分预报失败原因后的探测成果

矿区某穿脉,利用 TRT6000 型地质超前预报系统在掌子面进行现场探测,巷道腰线(从掌子面后退算起)的直线距离为 30 m,最小偏移距为 10 m,炮间距(即震源的排距)为 2 m,震源为 5 kg 的大锤,探测成果如下。

预报距离为 80 m。探测发现 2 个异常区。第一个异常在图中的分布为:中心线右侧 5 m 至右边 20 m,掌子面前方 60~70 m,可能为破碎带或节理裂隙带。第二个异常区域:中心线右侧 5 m 至右边 15 m,掌子面前方 85 m,有明显低阻抗含水异常,可能存在采空或巷道(图 6)。

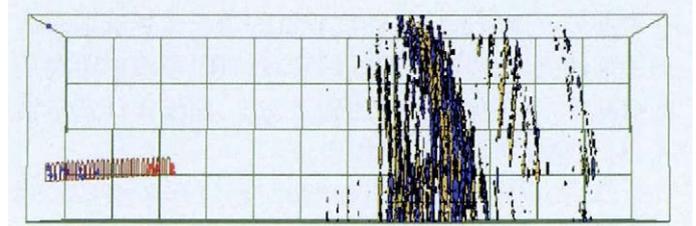


图 6 TRT 探测结果示意图(正视)

Fig. 6 Schematic diagram of the detection results of TRT (front view)

利用钻探对 TRT 探测成果进行验证。该位置施工 4 个钻孔(图 7),其中有 3 个钻孔揭露空区。揭露的岩性主要为闪长岩,次为夕卡岩。钻孔 TSA9(孔深 47.65~52.25 m)、TSA10(孔深 43.0~47.4 m)及 TSA8(孔深 51.00~55.80 m)揭露的空区具有明显的倾向和走向。根据剖面推测空区倾向近乎直立,走向北东,走向延长不详,空区内为渣充填,岩性以闪长岩为主,次为夕卡岩。对于 TRT 探测的第一处异常可能为该空区引起。对于第二处异常没有进行钻探验证,主要是因为钻孔无法施工到该异常区域。

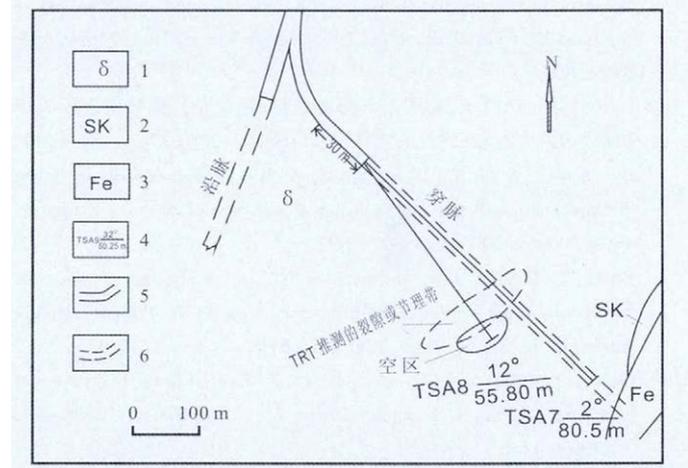


图 7 综合成果对比分析示意图

Fig. 7 Schematic diagram of comparative analysis

1—闪长岩(diorite) 2—夕卡岩(skarn) 3—矿体(orebody) 4—孔号/倾角/孔深(hole code/dipping angle/depth) 5—已施工巷道(worked tunnel); 6—设计巷道(designed tunnel)

通过对比分析可以看出,TRT 探测成果与钻探成果基本吻合。

### 4.3 建议

(1)对于场地的探测条件,尽量满足巷道腰线(从掌子面后退算起)至少要有 27 m(即炮检距 2 m + 最小偏移距 10 m + 检波器排距 5 m × 3 排)的直线距离,以保证采集数据的质量。

(2)TRT 预报的距离一般情况下为 80 m,但对于

巷道前方岩体较破碎且硬度较低的情况,影响地震波的传播速度,信号且有明显的衰减,TRT预报的距离要酌情减少.为了保证工程的施工安全,建议设计适量钻孔,对探测异常区进行钻探验证.

(3)在利用 TRT 进行探测时,要综合考虑各探测参数(震源、最小偏移距、炮间距).根据在矿山进行的应用试验研究结果,建议激发震源的锤子重量 5~6 kg 为宜,震源点布设在坚实、完整的岩壁上.最小偏移距在 10.0~20.0 m 之间为宜.炮间距(即震源的排距)在 2 m 左右为宜<sup>[5]</sup>.

## 5 结语

TRT 地质超前预报是众多预报方法中的一种,其具有操作简便、成本低、采集信息全面、直观等特点,越来越受到人们的关注.实践证明,2011 年在矿区深

部(稳定水位以下)共进行了 30 多次 TRT 探测,设计验证孔 40 多个,有效地保证了 2000 m 以下深部开拓工程安全顺利完成.因而,TRT 地质超前预报技术在矿山的应用具有良好的前景.

## 参考文献:

- [1]杨果林,杨立伟.隧道施工地质超前预报方法与探测技术研究[J].地下空间与工程学报,2006(4):627—630.
- [2]陈刚毅.TR T 地质超前预报技术及其在三峡翻坝高速公路中的应用[J].资源环境与工程,2009(3):304—307.
- [3]宋先海,顾汉明,等.我国隧道地质超前预报技术述评[J].地球物理学进展,2006(2):605—613.
- [4]李树德,柯福奎,洪长久.气举反循环钻探技术在复杂地层应用中的探讨[J].煤炭技术,2007(11):137—138.
- [5]王云海,马海涛,等.西石门铁矿深部开拓工程民采区突水危害地质超前预报技术研究[R].北京:中国安全生产科学研究院,2011(11):33—119.
- [11]Vavra G, Schmid R, Gebauer D. Internal morphology, habit and U-Th-Pb microanalysis of amphibole to granulite facies zircon: Geochronology of the Ivren Zone (Southern Alps) [J]. Contrib Mineral Petrol, 1999, 134: 380—404.
- [12]闫义,林炯,李自安.利用锆石形态、成分组成及年龄分析进行沉积物源区示踪的综合研究[J].大地构造与成矿学,2003,27(2):184—190.
- [13]Belousova E A, Griffin W L, O'Reilly S Y, et al. Igneous zircon: Trace element composition as an indicator of source rock type [J]. Contrib Mineral Petrol, 2002, 143: 602—622.
- [14]Buick R, Thorne J R, McNaughton N J, et al. Record of emergent continental crust similar to 3.5 billion years ago in the Pilbara craton of Australia [J]. Nature, 1995, 375: 574—575.
- [15]Geisler T, Pidgeon R T, Kurtz R, et al. Experimental hydrothermal alteration of partially metamict zircon [J]. Am Mineral, 2003, 88: 1496—1513.
- [16]Dempster T J, Hay D C, Bluck B J. Zircon grows in slate [J]. Geology, 2004, 32: 221—224.
- [17]吴元保,陈道公,夏群科,等.大别山黄土岭麻粒岩中锆石LAM-ICPMS微区微量元素分析和Pb-Pb定年[J].中国科学·D辑(地球科学),2003,46(11):20—28.
- [18]Hermann J, Rubatto D, Korsakov A. Multiple zircon growth during fast exhumation of diamondiferous, deeply subducted continental crust (Kokchetav Massif, Kazakhstan) [J]. Contrib Mineral Petrol, 2001, 141: 66—82.
- [19]李惠民,李怀坤,陈志宏,等.基性岩斜锆石U-Pb同位素定年3种方法之比较[J].地质通报,2007,26(2):128—135.
- [20]陈文,万渝生,李华芹,等.同位素地质年龄测定技术及应用[J].地质学报,2011,85(11):1917—1947.
- [21]周红英,李惠民.U-Pb同位素定年技术及其地质应用潜力[J].地质调查与研究,2011,34(1):63—70.
- [22]王勤燕,陈能松,刘嵘.U-Th-Pb副矿物的原地原位测年微束分析方法比较与微区晶体化学研究[J].地质科技情报,2005,24(1):7—13.
- [23]马芳芳,孙丰月,李碧乐.黑龙江东安金矿床锆石U-Pb年龄及其地质意义[J].地质与资源,2012,21(3):227—230.
- [24]徐学纯,李雪菲,赵庆英.蒙古哈尔乌拉花岗岩的锆石U-Pb定年及其岩石地球化学特征[J].地质与资源,2011,20(3):161—166.
- [25]Wilde S A, Valley J W, Peck W H. Evidence from detrital zircons for the existence of continental crust and oceans on the earth 414 Gyr ago [J]. Nature, 2001, 409(6817): 175—178.
- [26]Chen Y L, Li D P, Zhou J, et al. U-Pb ages of zircons in western Qinling Shan, China and their tectonic implications [J]. Earth Science Frontiers, 2008, 15(4): 88—107.
- [27]Vermeesch P. How many grains are needed for a provenance study? [J]. Earth and Planetary Science Letters, 2004, 224: 441—451.

(上接第 232 页 /Continued from Page 232)