

文章编号:1673-5005(2012)03-0065-04

# 联合垂直地震剖面资料提高地面地震资料分辨率的应用研究

陈双全<sup>1,2</sup>, 李向阳<sup>1,2</sup>

(1. 中国石油大学 油气资源与探测国家重点实验室, 北京 102249;  
2. 中国石油大学 中国石油天然气集团公司物探重点实验室, 北京 102249)

**摘要:**介绍利用三分量垂直地震剖面(VSP)资料中的纵波初至求取地层品质因子 $Q$ 值的原理及方法、稳定化的反 $Q$ 滤波方法,以及实现联合VSP地震资料进行反 $Q$ 滤波提高分辨率处理的技术流程。利用三分量VSP资料估算的弹性参数可以与地层的 $Q$ 值进行对比分析,证实估算的地层 $Q$ 值的准确性。实际VSP资料和过井的地面地震资料的应用研究结果表明,所提方法与技术流程是可行的,能够在不影响地震资料信噪比的情况下提高地面地震资料的分辨率。与VSP走廊叠加结果对比结果表明,提高分辨率后的地震资料与VSP结果具有很好的一致性。

**关键词:**垂直地震剖面(VSP);反 $Q$ 滤波;品质因子( $Q$ );分辨率;下行波

**中图分类号:**P 315.9      **文献标志码:**A      **doi:**10.3969/j.issn.1673-5005.2012.03.010

## Application of improving surface seismic resolution using vertical-seismic-profile data

CHEN Shuang-quan<sup>1,2</sup>, LI Xiang-yang<sup>1,2</sup>

(1. State Key Laboratory of Petroleum Resource and Prospecting in China University of Petroleum, Beijing 102249, China;  
2. CNPC Key Laboratory of Geophysical Prospecting in China University of Petroleum, Beijing 102249, China)

**Abstract:** The theory and method of quality factor ( $Q$ ) estimation using P-wave first break in three-component vertical-seismic-profile (VSP) seismic data, stabilized inverse  $Q$ -filtering method were given and a processing flow for improving surface seismic data resolution combined with VSP seismic data was proposed. The elastic parameters can be derived from three-component VSP seismic dataset, such as velocity ratio of P-and S-wave, Poisson's ratio and volume modulus. These parameters can be used to correct the  $Q$  model estimated from VSP seismic data. The results of real field VSP seismic data and seismic data across the well show that the methods and technique process are feasible. It can enhance the seismic resolution without effects on the seismic signal-to-noise ratio. Compared with the stacked VSP seismic trace to the seismic sections before and after inverse  $Q$  filtering, the seismic data with high resolution agrees well with the VSP results.

**Key words:** vertical-seismic-profile (VSP); inverse  $Q$ -filtering; quality factor( $Q$ ); resolution; down-going wave

油气勘探中的地震数据是地震反射波经地层传播后得到的。由于地下介质的非弹性性质,地震波经过地下介质后,地震波能量将会部分被吸收,而且地震波波形也会发生变化。产生这一结果的主要机制是地层的衰减特性,地层的衰减特性与地层的品质因子( $Q$ )值相关<sup>[1-2]</sup>。实验室和实际数据测量结果均表明,品质因子与岩石物性、流体类型及流体饱

和度等因素有关<sup>[3]</sup>。由于高分辨率地震资料是进行高分辨率层划分的基础资料<sup>[4]</sup>。因此,需要利用地层品质因子 $Q$ 值进行反 $Q$ 滤波补偿地震资料提高分辨率。Hale从Futterma模型出发提出反 $Q$ 滤波方法<sup>[5]</sup>。Bickel和Natarajan从平面波传播理论出发,在频率域提出反 $Q$ 滤波方法,且实现了时变 $Q$ 值的应用<sup>[6]</sup>。Hargreaves和Calvert提出常 $Q$

收稿日期:2011-04-18

基金项目:国家自然科学基金项目(41074080); 国家科技重大专项课题(2011ZX05019-008)

作者简介:陈双全(1975-),男(汉族),四川乐至人,助理研究员,博士,博士后,研究方向为地震各向异性与多波地震勘探。

值的相位补偿方法<sup>[7]</sup>。Bano 进一步提出常  $Q$  值的相位反  $Q$  滤波方法<sup>[8]</sup>。Wang 提出稳定化的常  $Q$  值地层模型,连续  $Q$  值模型的全反  $Q$  滤波方法,该方法能对振幅和相位同时进行有效的补偿和校正<sup>[9-11]</sup>。同时,对于多波多分量地震数据的反  $Q$  滤波处理,基于数据驱动的稳定化的反  $Q$  滤波方法,可以完成转换波的处理,不需要考虑地震波模式的转换问题<sup>[12]</sup>。笔者从实际零偏 VSP 资料出发,利用波场分离得到的下行纵波资料求取地层品质因子  $Q$  值,利用上行波资料进行走廊叠加得到高分辨率地震道数据,将  $Q$  值估算方法、稳定化的反  $Q$  滤波方法,以及实际地震数据相结合,提出联合 VSP 地震资料改进地面地震资料分辨率的技术流程与实现方法。

### 1 方法原理

#### 1.1 $Q$ 值估算

平面波在零偏 VSP 下行波传播中,从深度点  $z$  传播一段距离到  $z+\Delta z$  后,地震波场的振幅<sup>[13]</sup>在考虑衰减的情况下可以写为

$$A_{z+\Delta z} = A_z \exp\left(-\frac{\pi f \Delta z}{Q}\right) \tag{1}$$

式中,  $A_z$  为深度  $z$  处的地震波振幅;  $A_{z+\Delta z}$  为深度  $z+\Delta z$  处的地震波振幅;  $Q$  为地层衰减品质因子;  $f$  为频率。对式(1)取对数,并将深度域表示成时间域的函数:

$$\ln(A_{z+\Delta z}/A_z) = -\frac{\pi f}{Q}(t-t_0) \tag{2}$$

式(2)为线性方程,方程的斜率为

$$k = \frac{1}{f} \ln(A_{z+\Delta z}/A_z) \tag{3}$$

因此,层间的地层品质因子为

$$Q[z, z+\Delta z] = -\pi(t-t_0)/k \tag{4}$$

上述过程就是利用 VSP 零偏移距地震资料中的下行波场信息,采用谱比法<sup>[13]</sup>求取<sup>[13]</sup>  $Q$  值的计算方法。谱比法估算  $Q$  值较其他方法稳定,特别是对于波场信息比较准确的 VSP 地震资料。

#### 1.2 稳定化反 $Q$ 滤波方法

在地震波的正传播过程中,平面波场  $U(z, \omega)$  在传播了  $\Delta z$  距离后<sup>[14]</sup> 为

$$U(z+\Delta z, \omega) = U(z, \omega) \exp[-ik(\omega) \Delta z] \tag{5}$$

式中,  $\omega$  为角频率;  $k(\omega)$  为波数,它与地层的品质因子相关<sup>[15-16]</sup>:

$$k(\omega) = \left(1 - \frac{i}{2Q}\right) \frac{\omega}{v} \left(\frac{\omega}{\omega_h}\right)^{-\gamma} \tag{6}$$

式中,  $v$  为地震波的相速度;  $\gamma = (1/\pi) Q^{-1}$ ;  $\omega_h$  为与地震频带相关的调谐参数<sup>[17]</sup>。

反  $Q$  滤波方程为

$$U(z, \omega) = U(z+\Delta z, \omega) \exp[ik(\omega) \Delta z] \tag{7}$$

将式(6)代入式(7),并用波传播时间  $\tau$  代替传播距离  $z$  后,得

$$U(\tau+\Delta\tau, \omega) = U(\tau, \omega) \exp\left[\left(\frac{\omega}{\omega_h}\right)^{-\gamma} \frac{\omega \Delta\tau}{2Q}\right] \times \exp\left[i\left(\frac{\omega}{\omega_h}\right)^{-\gamma} \omega \Delta\tau\right] \tag{8}$$

式中的两个指数算子分别是反  $Q$  滤波处理中振幅和相位的相关项,可以简化为

$$U(\tau, \omega) = U(0, \omega) A(\tau, \omega) P(\tau, \omega) \tag{9}$$

其中

$$\begin{cases} A(\tau, \omega) = \exp\left[\int_0^\tau \left(\frac{\omega}{\omega_h}\right)^{-\gamma(\tau')} \frac{\omega}{2Q(\tau')} d\tau'\right], \\ P(\tau, \omega) = \exp\left[i\int_0^\tau \left(\frac{\omega}{\omega_h}\right)^{-\gamma(\tau')} \omega d\tau'\right]. \end{cases} \tag{10}$$

$P(\tau, \omega)$  是与相位补偿相关的项,与地层品质因子  $Q$  值不相关,即在反  $Q$  滤波中是可以进行稳定化求解的项。 $A(\tau, \omega)$  是与地震波振幅补偿相关的项,它是指函数形式,在补偿计算中会随深度或时间的增加而发散,在计算中是不稳定项,且受到地震资料信噪比的影响。图 1 中显示了不同  $Q$  值的振幅补偿曲线,振幅补偿值显示截止到  $3.5 \times 10^6$ ,而最大值可达到  $10^{45}$  数量级,如果用此振幅补偿项进行补偿必然会将深层的噪声放大。因此,实际地震数据中应用反  $Q$  滤波时,通常需要对振幅补偿曲线进行截取。

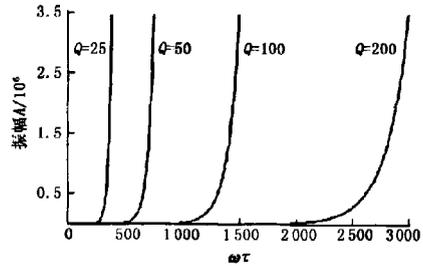


图 1 不同  $Q$  值的振幅补偿项  $A(\tau, \omega)$  的振幅补偿曲线对比

Fig. 1 Comparison of compensation curve with different  $Q$  value

为了能使反  $Q$  滤波中的振幅补偿稳定化,令

$$\beta(\tau, \omega) = \exp\left[-\int_0^\tau \left(\frac{\omega}{\omega_h}\right)^{-\gamma(\tau')} \frac{\omega}{2Q(\tau')} d\tau'\right] \tag{11}$$

则振幅补偿为式(11)的倒数形式。通过增加稳定化控制因子  $\sigma^2$  可以得到振幅补偿的表达式:

$$A(\tau, \omega) = \frac{\beta(\tau, \omega) + \sigma^2}{\beta^2(\tau, \omega) + \sigma^2} \tag{12}$$

稳定化后的反  $Q$  滤波方程为

$$U(\tau, \omega) = U(0, \omega) \Lambda(\tau, \omega) P(\tau, \omega). \quad (13)$$

式(12)分子项中的  $\sigma^2$  可以起到高频压制的作用。也就是说,如果在分子中没有此项,振幅补偿会对高频进行压制,反之则不会对高频进行压制。有了式(12)的振幅补偿因子,可以反计算得到稳定化的反振幅补偿因子:

$$\beta(\tau, \omega) = \frac{\Lambda(\tau, \omega)}{\Lambda^2(\tau, \omega) + |\sigma|^2}. \quad (14)$$

图 2 中对比了没有高频压制(图 2(a))和有高频压制(图 2(b))的稳定化振幅补偿曲线,同时图中还显示了两种情况下的反振幅补偿因子曲线。对比图 2 与图 1 中的非稳定化振幅补偿曲线,稳定化的反  $Q$  滤波的振幅补偿曲线更稳定可靠。

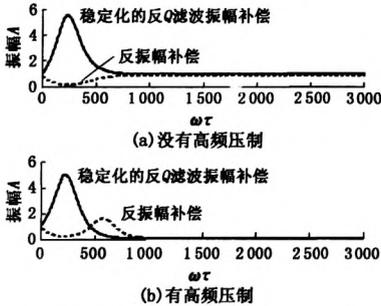


图 2 两种稳定化方法的振幅补偿曲线对比  
Fig. 2 Amplitude compensation comparison of two stabilization methods

## 2 方法实现与流程

上述的反  $Q$  滤波方法是在频率域表述的,因此,最终的时间域反  $Q$  滤波结果为

$$u(\tau) = \frac{1}{\pi} \int_0^{\infty} U(0, \omega) \Lambda(\tau, \omega) P(\tau, \omega) d\omega, \quad (15)$$

写成矩阵形式:

$$u = aU. \quad (16)$$

式中,  $u$  为反  $Q$  滤波补偿后的时间列向量;  $U$  为补偿前的列向量;  $a$  为振幅与相位补偿系数矩阵,其中

$$a_{i,j} = \frac{1}{N} \Lambda(\tau_i, \omega_j) P(\tau_i, \omega_j), \quad (17)$$

即反  $Q$  滤波后的波场  $u(\tau)$  是对所有频率的平面波  $U(\omega)$  加权求和,且加权因子是时变的,这相当于非线性滤波作用。

综上所述,利用 VSP 地震资料估算  $Q$  值,并进行地面地震资料的反  $Q$  滤波的流程如下:

- ① VSP 资料预处理;
- ② 上、下行波波场分离;

③ 提取下行波初至波,并计算其频谱;

④ 利用谱比法估算地层  $Q$  值;

⑤ 利用  $Q$  值,对地面地震资料进行频率域反  $Q$  滤波。

## 3 应用实例

在应用实例研究中, VSP 地震数据的并过含气性储层,且 VSP 地震数据是零偏的三分量数据。分别对 VSP 资料进行了预处理、波场分离和走廊叠加。图 3 中显示了原始的 VSP 地震数据和走廊叠加结果。图 3(a) 中的两条初至时间线分别是下行纵波(P 线)与横波(S 线)的初至,走廊叠加结果以同样的方式连续显示了 5 道数据。利用纵波初至时间,提取得到了下行纵波,并计算得到了频谱图(图 4)。将初至纵波的频谱,采用谱比法计算得到的  $Q$  值模型显示在图 5(d) 中。

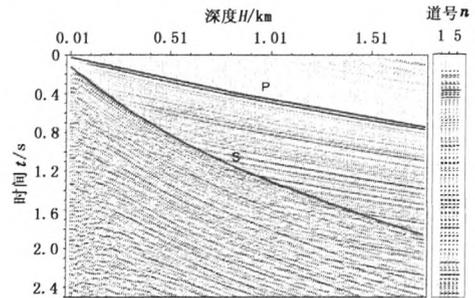


图 3 零偏移距的 VSP 资料(左)及其走廊叠加地震记录(右)

Fig. 3 Zero-offset VSP seismic data (left) and corridor stack section (right)

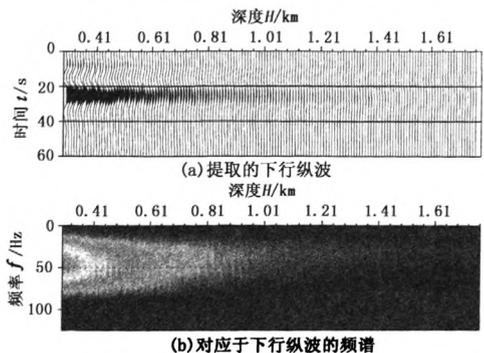


图 4 提取的 VSP 波的下行纵波初至波及其频谱

Fig. 4 Extracted P-wave arrival wave and its spectrum

由于 VSP 地震数据为三分量记录,所以可以利用下行纵波与横波的初至时间,计算得到地层的纵

横波的速度比(图5(a))、体积模量(图5(b))和泊松比(图5(c))。各参数在地层0.8 km以下趋于稳定,其中泊松比曲线变化较速度比和体积模量剧烈,且随深度的增加而减小,在0.9 km以下减小缓慢。由于储层含气,所以横波变化较小,纵波受到的影响较大(表现为速度减小),速度比与泊松比都会明显地减小。体积模量表征的是地层的压实情况,数值

越大,表征地层越压实,反之,地层越疏松。对比图5可以发现,纵横波速度比和泊松比都存在异常值,且泊松比表现得较明显,这些异常可能是地层含气造成的。而且,估算的 $Q$ 值曲线的变化也不相同,可以发现在0.9~1.0 km深度处的变化比较剧烈,与相应深度的泊松比曲线相对应,且在体积模量曲线上也表现为压实的变化特征。

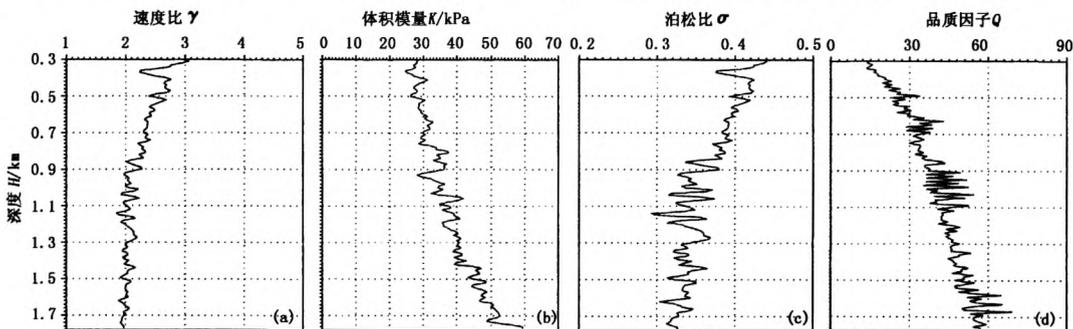


图5 利用VSP地震资料计算得到的弹性参数及衰减因子 $Q$ 值曲线  
Fig.5 Calculated elastic parameters and  $Q$  value curves using VSP seismic data

图5(d)中显示的层间 $Q$ 值曲线随深度的变化而变化, $Q$ 值均小于100,有明显的衰减与吸收作用。利用估算的 $Q$ 值,采用上述的稳定化反 $Q$ 滤波方法,对过VSP井的井旁地面地震资料进行了反 $Q$ 滤波补偿。图6展示了反 $Q$ 滤波提高分辨率处理前后的对比结果。反 $Q$ 滤波后的地面地震资料的视分辨率得到了提高,与VSP走廊叠道的对比,改进位置效果明显(图中箭头所示处)。同时,由于采用的稳定化反 $Q$ 滤波方法,其中的稳定因子不会对地震资料的信噪比产生影响,所以可以看到提高地震分辨率处理后的地震资料的信噪比与处理前的地面地震资料具有相当的信噪比。

#### 4 结束语

通过利用VSP资料估算 $Q$ 值和稳定化的反 $Q$ 滤波方法的实现,建立起了联合VSP地震资料求取地层的衰减 $Q$ 值因子,提高地面地震资料分辨率的实现方法与技术流程。应用实例的结果达到了提高地面地震资料分辨率目的。对地面地震资料的处理是在频率域进行的,具有很好的稳定性,并保持了地震资料的信噪比水平。同时,利用三分量的VSP资料可以得到地层弹性参数信息,如纵横波速度比、地层的体积模量、泊松比等,它们是VSP资料处理中的附属输出,可以作为 $Q$ 值模型估算结果的参考,验证 $Q$ 值模型的正确性。

在 $Q$ 值估算中,本文中仅使用了VSP地震资料。在有声波测井数据,而没有VSP地震资料的情况下,结合井震匹配估算地层 $Q$ 值,也可以得到高精度的 $Q$ 值模型,从而提高地面地震资料分辨率。

#### 参考文献:

[1] AKI K, RICHARDS P G. Quantitative seismology: theory and methods [M]. San Francisco: W H Freeman & Co, 1980.

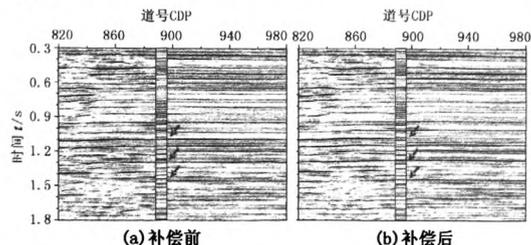


图6 地面地震资料与VSP走廊叠道在反 $Q$ 滤波前后的对比

Fig.6 Comparison of surface seismic section to VSP corridor stack record before and after inverse  $Q$ -filtering processing

(下转第75页)

- [J]. Universitatis Pekinensis (Acta Scientiarum Naturalium), 2001,37(3):379-384.
- [13] 甘利灯. 四维地震技术及其在水驱油藏监测中的应用[D]. 北京:中国地质大学能源学院,2002.  
GAN Li-deng. 4D seismic and it's application to the monitoring of water flooding reservoir[D]. Beijing: School of Energy Resources, China University of Geosciences, 2002.
- [14] 马中高,伍向阳. 有效压力对岩石纵横波速度的影响[J]. 勘探地球物理进展,2006,29(3):183-186.  
MA Zhong-gao, WU Xiang-yang. Effects of effective pressure on wave velocities on rocks[J]. Progress in Exploration Geophysics, 2006,29(3):183-186.
- [15] MAVKO G, MUKERJI T, DVORKIN J. The rock physics handbook:tools for seismic analysis in porous media [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1998: 208-210.
- [16] 王炳章. 地震岩石物理学及其应用研究[D]. 成都: 成都理工大学信息工程学院,2008.  
WANG Bing-zhang. Seismic rock physics and its applied research [D]. Chengdu: College of Information Engineering, Chengdu University of Science and Technology, 2008.
- [17] BIOT M A. Theory of propagation of elastic waves in a fluid saturated porous solid, I: low frequency range, and II: higher-frequency range [J]. Journal of the Acoustical Society of America, 1956,28:168-196.
- [18] GASSMANN F. Elastic waves through a packing of spheres[J]. Geophysics, 1951,16:673-685.
- [19] MACKO G, JIZBAD D. Estimating grain-scale fluid effects on velocity dispersion in rock [J]. Geophysics, 1991,56:1940-1949.
- [20] DVORKIN J, MAVKO G, NUR A. Squirt flow in fully saturated rocks [J]. Geophysics, 1995,60:97-107.

(编辑 修荣荣)

(上接第68页)

- [2] GASSMANN F. Über die Elastizität poroser Medien [J]. Vierteljahrsschrift der Naturforschenden Gesellschaft in Zürich, 1951,96(2):1-23.
- [3] BATZLE M L, HAN D, HOFMANN R. Fluid mobility and frequency-dependent seismic velocity-direct measurements [J]. Geophysics, 2006, 71(6):N1-N9.
- [4] 李增学,韩美莲,魏久传,等. 鄂尔多斯盆地上古生界高分辨率层序划分与煤聚积规律分析[J]. 中国石油大学学报:自然科学版,2008,32(1):5-11.  
LI Zeng-xue, HAN Mei-lian, WEI Jiu-chuan, et al. Analysis of high-resolution sequence stratigraphy and coal accumulation law of upper Paleozoic earthen in Ordos Basin[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2008,32(1):5-11.
- [5] HALE D. An inverse Q-filter [R/OL]. SEP Report 1981,26:231-243 [1981-10-26]. [http://sepwww.stanford.edu/theses/sep26/26\\_22\\_abs.html](http://sepwww.stanford.edu/theses/sep26/26_22_abs.html).
- [6] BICKEL S H, NATARAJAN R R. Plane-wave Q deconvolution [J]. Geophysics, 1985,50(9):1426-1439.
- [7] HARGREAVES N D, CALVERT A J. Inverse Q filtering by Fourier transform [J]. Geophysics, 1991,56(4):519-527.
- [8] BANO M. Q-phase compensation of seismic records in the frequency domain [J]. Bull Seis Soc Am, 1996,86(4):1179-1186.
- [9] WANG Y H. A stable and efficient approach of inverse Q filtering [J]. Geophysics, 2002,67(2):657-663.
- [10] WANG Y H. Quantifying the effectiveness of stabilized inverse Q filtering [J]. Geophysics, 2003,68(1):337-345.
- [11] WANG Y H. Inverse Q filter for seismic resolution enhancement [J]. Geophysics 2006,71(3):V51-60.
- [12] CHEN S Q, WANG Y H. Inverse Q filtering in 3D P-P and P-SV seismic data: a case study from Sichuan Basin, China[C/OL]. 70th EAGE Conference & Exhibition, In session "Attenuation / Velocity Model Building". 2008. P171 [2008-06-11]. <http://www.earthdoc.org/detail.php?pubid=10116>.
- [13] TONN R. The determination of the seismic quality factor Q from VSP data: a comparison of different computational methods [J]. Geophys Prosp, 1991,39(3):1-28.
- [14] CLAERBOUT J F. Fundamentals of geophysical data processing [M]. New York: McGraw-Hill Book Co, 1976.
- [15] KOISKY H. The propagation of stress pulses in viscoelastic solids [J]. Phil Mag, 1956,8(1):673-710.
- [16] KJARTANSSON E. Constant Q wave propagation and attenuation [J]. J Geophys Res, 1979,84(2):4737-4748.
- [17] WANG Y, GUO J. Modified Kolsky model for seismic attenuation and dispersion [J]. Journal of Geophysics and Engineering, 2004,1(2):187-196.

(编辑 修荣荣)