

气泡对沉积物声学特性影响研究: 以东海沉积物为例

李红星 陶春辉 刘富林 周建平

Effect of gas bubble on acoustic characteristic of sediment: taking sediment from East China Sea for example

Li Hong-Xing Tao Chun-Hui Liu Fu-Lin Zhou Jian-Ping

引用信息 Citation: [Acta Physica Sinica](#), 64, 109101 (2015) DOI: 10.7498/aps.64.109101

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.109101>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2015/V64/I10>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

饱和砂岩的滞弹性弛豫衰减特征及微观机理的探索

Viscoelastic relaxation attenuation property for saturated sandstones and corresponding investigation of micro-scale mechanism

物理学报.2012, 61(14): 149101 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.61.149101>

气泡对沉积物声学特性影响研究: 以东海沉积物为例*

李红星^{1)†} 陶春辉²⁾ 刘富林¹⁾ 周建平²⁾

1)(东华理工大学核工程与地球物理学院, 南昌 330013)

2)(国家海洋局第二海洋研究所, 杭州 310012)

(2014年8月7日收到; 2014年11月19日收到修改稿)

气泡对海底沉积物的声学物理特性的影响在海洋学、海洋地质学和海洋地球物理学等领域中都有着重要的研究意义. 利用 Micro-CT 扫描仪对沉积物样品进行无损检测扫描, 根据沉积物样品中水、气和固体颗粒对 X 射线吸收率的不同, 提取了沉积物的气体体积(气泡)含量. 利用智能非金属超声检测仪对沉积物样品进行超声无损测定, 得到沉积物声速与衰减. 通过回归分析, 建立了样品采集海域沉积物孔隙填充气体与流体含量与沉积物声学特性之间的相关关系. 结果表明: 含气量的少许增大就会引起声速的急剧降低和声衰减的急剧上升, 但含气量超过 10% 后, 这种上升和降低的幅度明显减小.

关键词: 海底沉积物, 声学特性, CT 扫描, 气泡

PACS: 91.60.Lj, 91.60.Qr, 93.85.+q, 91.65.Rg

DOI: 10.7498/aps.64.109101

1 引言

海底广泛分布着含气沉积物. 随着海底油气勘探与开发、海底工程建设及海洋环境与地质灾害防治等各项事业的发展, 含气沉积物的研究对于科学及工业界具有越来越重要的意义. 声学方法一直是进行海底沉积物特性研究的最主要和有效的方法. 在含气沉积物中声波速度、衰减、反射和散射特征都与饱和水沉积物中的声学特性存在很大的差异: 气泡会改变沉积物的物理力学特性进而影响声波传播速度; 当气泡受到声波激励时, 其阻尼振荡会引起较高的声波衰减; 由于共振现象的存在, 气泡会影响沉积物声速及衰减的频散特性; 即使很少量的气泡也会对沉积物的声学特性产生极大的影响. 因此, 对含气沉积物的声学特性进行研究具有重要的科学意义和广阔的应用前景. 20 世纪 80 年代, Anderson 和 Loyd 详细研究了含气沉积

物中气泡对声波传播的影响, 建立了含气沉积物声速和声衰减模型 (Anderson-Hampton 模型)^[1,2]; Fu 等^[3], Wilkens 和 Richardson^[4] 利用原位声学测试方法对含气泡沉积物的声学特性进行了研究; Laier 等^[5] 对利用声学测量对浅层气的纵深分布进行了研究; Greene 和 Wilson^[6] 研究了海底气渗漏的声学遥测方法. 浅地层剖面或地震调查剖面上出现的声学空白带、声学幕、声学扰动、不规则强反射顶界面、两侧相位下拉、海底麻坑、大型塌陷坑、声学羽流、云状扰动、点划线反射等都成为证明沉积物或海水中含气的最有力的声学特性证据^[7-12]. 我国研究人员对沉积物声学特性也进行了很多研究. 唐永禄^[13], 卢博等^[14] 对沉积物声学特性与土工力学特性的经验关系进行了大量研究. 李红星等^[15,16], 陶春辉等^[17] 基于杭州湾多频原位测试数据修正了 Biot 模型, 初步建立了考虑游离气总含量的含气泡沉积物理论模型并进行了反演计算, 但

* 国家自然科学基金(批准号: 41364004, 41104073)、国家 729 重大专项(批准号: GZH200900502)、国家高技术研究发展计划(批准号: 2012AA09A404)和江西省自然科学基金(批准号: 2010GQS0002)资助的课题.

† 通信作者. E-mail: lihongxingniran@163.com

沉积物中气泡含量缺乏测量数据. 李红星等^[18,19]对多相介质的弹性波传播进行了数值模拟, 并结合天然气水合物地震勘探对含气地层的地震波记录进行了研究. 阚光明等^[20]对南海、黄海中部海底沉积物声阻抗与土力学特性关系进行了研究. 本文利用 Micro-CT 扫描仪对沉积物样品进行无损检测扫描, 根据沉积物样品中水、气和固体颗粒对 X 射线吸收率的不同, 提取了沉积物的含水量、气体(气泡)含量. 利用智能非金属超声检测仪对沉积物样品进行超声无损测定, 得到沉积物声速与衰减. 通过回归分析, 建立了样品采集海域沉积物孔隙填充气体和流体含量与沉积物声学特性之间的相关关系, 获得了一些有益的结果.

2 海底沉积物含气量测量方法

CT 扫描技术的原理是通过 X 射线源发射出 X 射线束, 对测试的样品从多个方向进行断层扫描, 在通过探测器超声和测定透过样品的 X 射线量. CT 值的定义为

$$H = k(\mu - \mu_w) / \mu_w, \quad (1)$$

H 为扫描切片上某一像素点的 CT 值, μ 为某物质的 X 射线吸收系数, μ_w 为标准物质的 X 射线吸收(衰减)系数, k 为分度因子. 1969 年, 英国的 Hounsfield 建立了医用 CT 机的标准方程, 取 $k = 1000$, 并用水作为标准物质, (1) 式变为

$$H = 1000(\mu - \mu_w) / \mu_w, \quad (2)$$

H 的单位为 HU (Hounsfield unit). 根据 (1) 和 (2) 式可知, 不同的物质对 X 射线有不同的吸收系数, 在切片图像上有不同的 CT 值分布范围, CT 图像就是一系列对 X 射线吸收系数二维分布图.

不同的测试样品对 X 射线的吸收系数 μ 可以表示为

$$\mu = \mu_m \rho, \quad (3)$$

μ_m 为某物质的质量吸收系数, ρ 为某物质的密度. 将 (3) 式代入 (2) 式可得

$$\rho = \frac{\mu_w \left(1 + \frac{H}{1000} \right)}{\mu_m}. \quad (4)$$

从 (4) 式可以看出, 物质的密度与 X 射线的质量吸收系数成反比的关系, 与 CT 值成正比的关系, 因此, 在已知测试样品吸收系数的情况下, 利用 CT

扫描图像上 CT 值分布范围的不同, 就可以提取不同密度成分和组分的物质含量, 对沉积物样品而言, 可以根据测试 CT 值分布统计提取沉积物中气体、水和固体颗粒物的百分比含量.



图1 西门子显微CT

Fig. 1. Micro-CT of Siemens.



图2 重力取样器

Fig. 2. Gravity sampling device.



图3 海底沉积物样品

Fig. 3. Ocean bottom sediments.

测试使用的 Micro-CT 扫描仪为当前国际上最先进的西门子显微CT(图1). 根据沉积物的实际大小, 沉积物试验测量时的分辨率为 $96 \mu\text{m}$, 仪器的发射电压为 80 kV . 利用海洋重力取样器(图2)在东海进行了海底沉积物取样, 取样后沉积物被密

封在一个为长度 150—160 mm, 直径 $d = 70$ mm 左右的聚氯乙烯材料 PVC 管中, 护管壁厚度为 6 mm (图 3). 为了能更好地统计流体与气体含量, 进行了纯流体与纯气体样品测试, 根据流体与气体测试结果分别提取流体与气体的 CT 值分布范围 (图 4), 并据此分布范围对沉积物样品的测试结果进行统计分析.

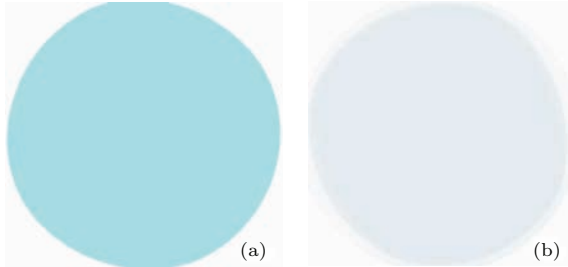


图 4 (网刊彩色) 流体与气体 CT 值分布测试 (a) 流体测试结果; (b) 气体测试结果
Fig. 4. (color online) CT number of liquid and gas: (a) result of liquid; (b) result of gas.

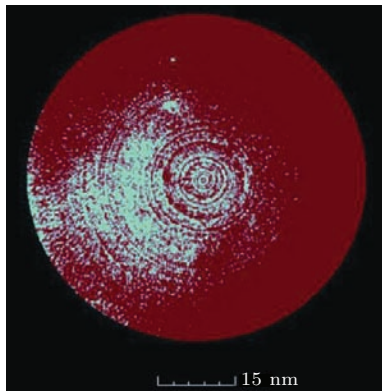


图 5 (网刊彩色) 沉积物 CT 测试切片
Fig. 5. (color online) CT measuring section of sediments.

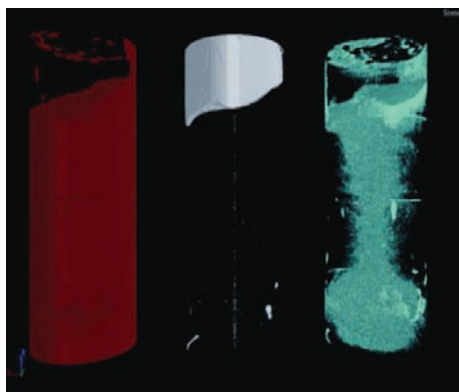


图 6 (网刊彩色) 沉积物 CT 不同相态三维重构
Fig. 6. (color online) Three-dimensional reconstruction of different phase states of sediments.

每个沉积物样品 CT 测试后, 形成原始切片 3484 张 (图 5), 根据前序流体和气体的 CT 分布范

围的不同可以在切片中将流体、气体、固体颗粒区分开 (白色代表气体, 蓝色代表流体, 红色代表固体). 经过分析软件对每个样品所形成的切片重构后形成固、液、气三种相态的三维分布 (图 6), 并可计算气体的体积含量.

3 海底沉积物声学特性测量方法

采用 BJNM-1 型智能非金属超声检测仪进行声速测试, 声波换能器的发射频率是 40 kHz, 采用样品直立测试方式 (图 7).

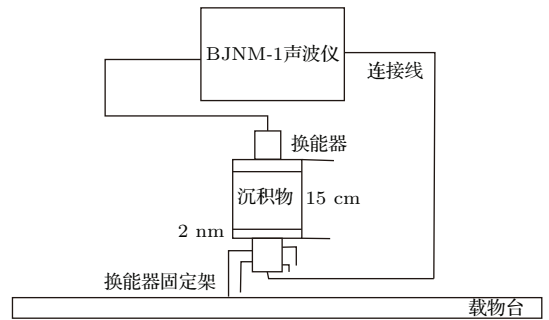


图 7 垂向声速测量原理图

Fig. 7. Schematic diagram of acoustic measurement.

利用游标卡尺测得沉积物样品长度 (L), 两侧样品封装管壁长度 (L_1), 根据声波测试可得声波穿透沉积物样品的时间 (t) 和穿透两侧样品封装管壁的时间 (t_1), 则沉积物的声速计算公式为

$$V = \frac{L - L_1}{t - t_1}, \quad (5)$$

其中, V 是沉积物的声速 ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$), 用游标卡尺测 L 和 L_1 (m). 提取沉积物声速的关键在于提取声波只在沉积物中的旅行时 ($t - t_1$). 本文采用取样管壁测试声波信号 (图 8) 与样品测试声波信号 (图 9) 的互相关计算声波只在沉积物中的旅行时.

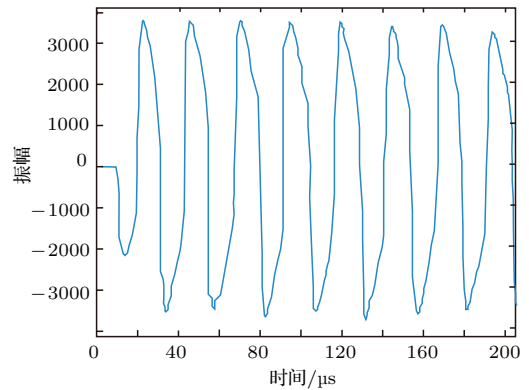


图 8 取样管壁测试声波信号

Fig. 8. Acoustic wave signal of shell of sampling pipe.

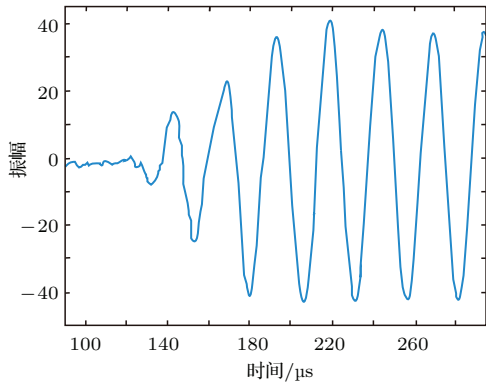


图9 样品测试声波信号

Fig. 9. Acoustic wave signal of sediment sample.

衰减计算采用功率谱方法. 在相同增益条件下, 样品的测量信号 $y(t)$ 的频谱为 $Y(W)$ (图10), 对应取样管壁测试声波信号 $g(t)$ 的频谱为 $G(W)$ (图11), 则

$$A = \left| \frac{G(W)}{Y(W)} \right|^2. \quad (6)$$

沉积物的衰减系数的计算公式可表示为

$$\alpha = \frac{1}{2(L - L_1)} \ln(A). \quad (7)$$

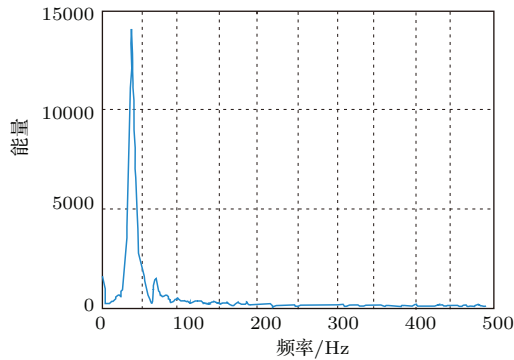


图10 样品测试声波信号频谱

Fig. 10. Signal frequency spectrum of acoustic wave signal of sediment sample.

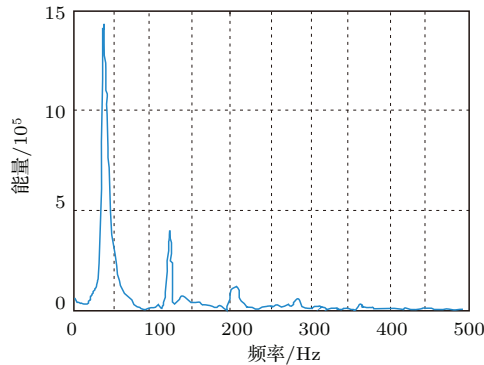


图11 取样管壁测试声波信号频谱

Fig. 11. Signal frequency spectrum of acoustic wave signal of sampling pipe.

4 含气沉积物声学特性分析

对东海海域的25个沉积物样品进行了CT扫描及声学测量, 获取了样品中气体体积含量、声速和声衰减参数. 通过试验分析, 选择幂函数作为数据拟合函数, 对沉积物的声速与气体含量、声衰减与气体含量进行回归分析.

气体含量与声衰减的拟合(图12)函数为

$$\alpha = 18.3 \times q^{-0.85892} + 19.3 \quad R = 0.92. \quad (8)$$

气体含量与声速的拟合(图13)函数为

$$V = 2023 \times q^{-0.09761} - 351.5 \quad R = 0.77. \quad (9)$$

q 为沉积物中气体体积含量.

从图13可以看出, 沉积物的声衰减系数随着沉积物气体体积含量的增加而增大, 气体含量在10%以内时, 声衰减系数急剧增大, 在气体含量大于10%后, 声衰减系数增大相对放缓. 从图14可以看出, 沉积物的声速随着沉积物气体体积含量的增加而减小, 气体含量在10%以内时, 声速急剧减小, 在气体含量大于10%后, 声速减小相对放缓. 该结论对油气地震勘探有指导意义.

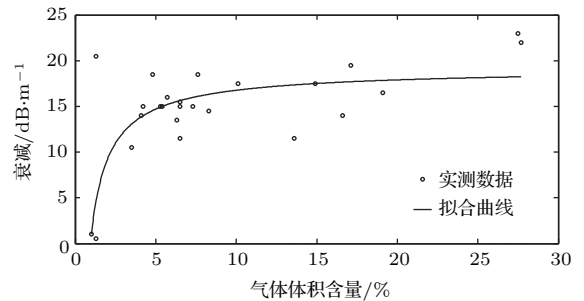


图12 沉积物气体体积含量与声衰减拟合曲线

Fig. 12. Fitted curve between acoustic attenuation and gas content.

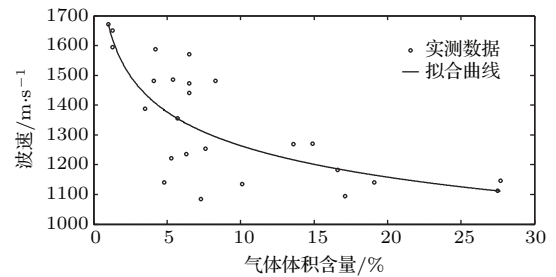


图13 沉积物气体体积含量与声速拟合曲线

Fig. 13. Fitted curve between acoustic velocity and gas content.

5 结 论

通过本文研究,取得以下两点重要结论:

1) 在海底沉积物测试中引入了Micro-CT三维扫描技术,利用沉积物中固相颗粒,孔隙气体和孔隙中水对X射线的吸收系数不同,可无损提取沉积物中气体体积含量,也可提取流体、固体颗粒体积含量,进一步计算孔隙度、含水率、含水饱和度等参数;

2) 以在东海海域采集的沉积物样品为样本,对沉积物中的气体体积含量及声波波速与衰减进行了测试、提取;通过幂函数对气体含量与声速、衰减进行了拟合分析,得到了相关经验公式;从结果可以看出,沉积物的声衰减系数(声速)随着沉积物气体体积含量的增加而增大(减小),气体含量在10%以内时,声衰减系数(声速)急剧增大(减小),在气体含量大于10%后,声衰减系数(声速)增大(减小)相对变缓.该结论对油气地震勘探有指导意义.

参考文献

- [1] Anderson L A, Loyd D H 1980 *J. Acoust. Soc. Am.* **67** 1865
- [2] Anderson L A, Loyd D H 1980 *J. Acoust. Soc. Am.* **67** 1890
- [3] Fu S S, Wilkens R H, Frazer L N 1996 *Geo-Marine Lett.* **16** 249
- [4] Wilkens R H, Richardson M D 1998 *Continen. Shelf Res.* **18** 1859
- [5] Laier T, Jensen J B 2007 *Geo-Marine Lett.* **27** 127
- [6] Greene C A, Wilson P S 2010 *J. Acoust. Soc. Am.* **127** 1938
- [7] Friedrich A, Anderson L A 1997 *Marine Geology* **137** 137
- [8] Fleischer P, Orsi T H, Richardson M D 2001 *Geo-Marine Lett.* **21** 103
- [9] Emanuele L, Angelo C, Gianni M, Umberta T, Giuliana R 2002 *Geophys. J. Int.* **148** 103
- [10] Thomas J G, Gil Y K, Soo C P, Roy H W, Dae C K, Gwang H L, Young K S 2003 *Continent. Shelf Res.* **23** 821
- [11] Barthold M S, Ruud T E 2003 *J. Geochem. Explor.* **78** 305
- [12] Wunderlich J, Wendt G, Muller S 2005 *Marine Geophys. Res.* **26** 123
- [13] Tang Y L 1998 *Acta Oceanol. Sin.* **20** 39 (in Chinese) [唐永禄 1998 海洋学报 **20** 39]
- [14] Lu B, Li G X, Huang S J, Zhang F S 2005 *Ocean Technol.* **24** 28 (in Chinese) [卢博, 李赶先, 黄韶健, 张福生 2005 海洋技术 **24** 28]
- [15] Li H X, Tao C H, Liu C, Deng X M, Zhou J P, Zhang J H, Gu C H, He Y H 2007 *Adv. Marine Sci.* **25** 474 (in Chinese) [李红星, 陶春辉, 刘财, 邓显明, 周建平, 张金辉, 顾春华, 何拥华 2007 海洋科学进展 **25** 474]
- [16] Li H X, Tao C H, Liu C, Deng X M, Zhou J P, Zhang J H, Gu C H, He Y H 2007 *J. Jilin Univ. (Earth Sci. Ed.)* **37** 1034 (in Chinese) [李红星, 陶春辉, 刘财, 邓显明, 周建平, 张金辉, 顾春华, 何拥华 2007 吉林大学学报(地球科学版) **37** 1034]
- [17] Tao C H, Li H X, Deng X M, Zhou J P, Fu S S, Wilkens R H, Gu C H, He Y H 2010 *China Ocean Engin.* **24** 381
- [18] Li H X, Tao C H 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 2836 (in Chinese) [李红星, 陶春辉 2009 物理学报 **58** 2836]
- [19] Li H X, Tao C H, Zhou J P, Deng J Z, Deng X M, Fang G X 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 8083 (in Chinese) [李红星, 陶春辉, 周建平, 邓居智, 邓显明, 方根显 2009 物理学报 **58** 8083]
- [20] Kan G M, Su Y F, Liu B H, Li G B, Meng X M 2014 *J. Jilin Univ. (Earth Sci. Ed.)* **44** 386 (in Chinese) [阚光明, 苏远峰, 刘保华, 李官保, 孟祥梅 2014 吉林大学学报(地球科学版) **44** 386]

Effect of gas bubble on acoustic characteristic of sediment: taking sediment from East China Sea for example*

Li Hong-Xing^{1)†} Tao Chun-Hui²⁾ Liu Fu-Lin¹⁾ Zhou Jian-Ping²⁾

1) (College of Nuclear Engineering and Geophysics, East China Institute of Technology, Nanchang 330013, China)

2) (Second Institute of Oceanography, State Oceanic Administration, Hangzhou 310012, China)

(Received 7 August 2014; revised manuscript received 19 November 2014)

Abstract

The effect of gas bubble on acoustic characteristic of sediment is important for ocean science, ocean geology, ocean geophysics, etc. Twenty five samples of ocean bottom sediments are extracted through gravity sampling equipment from the East China Sea and are sealed in PVC pipes for storage in order to study the effect of gas bubble on acoustic characteristic of sediment. In order to obtain the gas content of sediment, in this the paper the Micro-CT scanning technology is introduced into sediment measuring method. The different X ray absorption rates of water, gas and solid particles in sediment samples are obtained through Micro-CT scanning using Siemens' Micro-CT scanner. The gas volume content and water volume content in sediment can be obtained according to CT number distribution. The acoustic measurement is carried out in laboratory using intelligent nonmetal ultrasonic detector and the 40 kHz waves are launched from one side of the sediment sample and obtained from another side. The acoustic attenuation can be obtained according to the amplitudes of launched and received waves and the acoustic velocity can be obtained according to travelling time when acoustic wave goes through the sediment. The attenuation of sediment sample is about a few to twenty and the velocity is about 1100 to 1700 m·s⁻¹. By mean of analysis of regression, the correlations are obtained among gas content, fluid content, acoustic velocity, attenuation and power function, which better match the measuring data. The result of study indicates that slight augment of gas content can cause sharp decrease of acoustic velocity and rapid increase of acoustic attenuation. The increment and decrement decrease obviously when the gas content exceeds 10%. The result in this paper is useful to explore oil and gas seismic.

Keywords: sea sediment, acoustic characteristic, CT scanning, gas bubble

PACS: 91.60.Lj, 91.60.Qr, 93.85.+q, 91.65.Rg

DOI: 10.7498/aps.64.109101

* Project supported By the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 41364004, 41104073), the National 729 Major Projects, China (Grant No. GZH200900502), the National High Technology Research and Development Program of China (Grant No. 2012AA09A404) and the Natural Science Foundation of Jiangxi Province, China (Grant No. 2010GQS0002).

† Corresponding author. E-mail: lihongxingniran@163.com