

垂直振动和摇摆振动在人体下肢传递的研究

马超¹ 杨建鑫¹ 李志香¹ 张春林¹ 张明² 谈诚¹

摘要 目的 研究在膝关节锁定、膝关节固定角度以及膝关节自然状态的站立条件下相同振动频率不同形式的振动在人体下肢内的传递情况。方法 以摇摆振动和垂直振动作为激励施加与受试者足底,进行三种站立条件下人体跟骨、外踝、胫骨外髁以及股骨外侧髁等处的振动测试,并运用转子动力学全相位能量补偿法进行人体下肢的振动传递分析,得到了摇摆振动和垂直振动过程中,三种不同的站立条件下人体跟骨、外踝、胫骨外髁以及股骨外侧髁等处的振动传递及振动加速度的分布。结果 在相同频率条件下,与摇摆振动激励方式相比,垂直振动激励下人体下肢标记点加速度明显减小,振动传递比较大;对同一个受试者垂,直振动在人体下肢的传递要比摇摆振动的传递稳定。此结果对于深入了解全身振动对人体骨骼及肌肉的锻炼及骨科疾病的防护有一定的借鉴作用。

关键词 振动传递; 摇摆振动; 垂直振动; 人体动力学

DOI: 10.3969/j.issn.1002-3208.2009.06.19

中图分类号 R318.01 文献标志码 A 文章编号 1002-3208(2009)06-0638-05

Transmissibility of Swing and Vertical Vibrations in Human Lower Limb

MA Chao¹ YANG Jianxin¹ LIZhixiang¹ ZHANG Chunlin¹ ZHANG Ming² TAN Cheng¹

¹ School of Mechanical and Vehicular Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081

² Department of Health Technology and Informatics, the Hong Kong Polytechnic University, Hong Kong, China

【Abstract】 Objective To investigate the transmissibility of the swing and the vertical vibration in human lower limb with three postures, eg. the knee lock, knee angle lock and knee normal conditions. Methods The swing and vertical vibrations were added on the subject's foot segments and then the points on the calcaneus, lateral malleolus, tibial lateral condyle and femur lateral condyle were monitored when the subjects were with 3 postures. The phase difference correcting methods of discrete spectrum which were widely used in rotor dynamics analysis were applied in the transmissibility analysis. The transmissibility and energy distribution of marked points on the lower limb with three postures during swing and vertical vibrating process were obtained. Results It was indicated that the vertical vibration accelerations of marked points in the subject's lower limbs were greater with same postures than those of swing vibration. And the transmissibility ratios of those marked point of vertical vibration were a little greater than those of swing vibration. Also the vertical vibration transmissibility was steadier than the swings.

【Key words】 transmissibility; vertical vibration; swing vibration; human dynamics

0 引言

近年来,由于低频低幅的全身振动对于骨骼和肌肉系统的锻炼作用,在治疗和预防老年性骨质疏松、航天失重环境所导致骨丢失和肌肉萎缩的防护,肌肉锻炼

作者单位: 1 北京理工大学机械与车辆工程学院 (北京 100081)

2 香港理工大学医疗科技及资讯学系 (中国香港)

作者简介: 马超,男,研究方向为机械设计生物力学

和康复训练等领域中引起了国内外众多学者的关注。

研究表明, 低频低幅的全身振动可以有效地提高人体肌肉的力量以及肢体的爆发力, 而且能显著提高机体的平衡性。S Torvinen 等人^[1-4]对单次振动 (4 min)、长期振动 (4~8 月) 以及振动的后继效应 (振动 8 月后恢复 8 月) 进行了详细的观察。结果显示, 低频低幅的左右摇摆式振动最能够有效地增加肌肉的爆发力。在接受低频低幅振动刺激 (15~30 Hz, 10 mm, 3.5~14 s) 后, 单次振动组被试者的最大弹跳高度较振动前增加 2.5%, 下肢肌力增加 3.2%, 身体平衡性增加 15.7%; 而在接受 2~4 min/日, 3~5 次/周的长期振动后, 最大弹跳高度较振动前增加 7.8%, 下肢肌力在振动 2 月后增加 3.7%; 即使在接受长期振动 8 月后恢复的第 8 个月时, 最大弹跳高度仍然较振动前提高约 3.0%。R R Cosinc 等^[5]对 29 名 (15 名实验组, 14 名对照组) 绝经期后妇女进行为期 6 个月的振动观察, 结果也表明 28 Hz, 2 次/周, 6 min 次的振动刺激作用能有效的增加肌肉功和肌肉收缩速度, 但肌力的变化则不明显。

全身振动对骨形成的有效刺激是近年来关注的另外一个热点。Rubin 对 70 名绝经期后妇女进行为期 1 年的振动治疗 (30 Hz, 10 min 次, 2 次/天, 每次间隔 > 10 h, 7 天/周), 骨密度增加 3.35%^[6]。提示振动刺激能有效地刺激骨形成, 防止骨质疏松的发生。W Katé^[7]对 20 名脑瘫患儿的振动治疗表明, 90 Hz, 10 min 次, 5 次/周, 持续 6 月的振动刺激能够刺激患儿松质骨的形成。另外, C Rubin, S Judex, J M Lamothe, Ward 等人对大鼠、火鸡及绵羊等动物进行了时间不等的振动刺激^[8-11]。实验结果表明, 实验动物的骨形成率、骨密度值以及骨矿盐含量均有明显的升高 (分别增加 40%~87%, 17.7%, 10.6%)。另外, 研究也证实不同振动刺激可诱发成骨细胞 mRNA 的改变, 这些研究都证实了振动对骨骼系统有着有益的刺激作用。

全身振动作为肌肉锻炼和骨丢失防治措施的作用, 目前已经得到肯定, 但何种方式的振动更为合理有效, 似乎还有许多争议。因此, 采取何种振动模式才能取得最佳的效果, 不同振动模式在身体内的传递过程究竟是如何, 成为影响人们进一步探讨有关振动防护有效性和可能造成损害的阻碍, 开展相关研究, 对于解决这一问题, 将有极大的帮助。文中讨论了垂直振动和摇摆振动在人体下肢的传递情况。

1 方法

1.1 受试者和实验设备

本研究通过三维光学测量系统, 观察垂直振动和摇摆振动在人体下肢的传递情况。受试者为北京理工大学研究生, 男性, 年龄 29 岁, 身高 171 cm, 体重 61 kg, 身体健康。实验中使用的测试系统为 Optotrak 测试系统, 垂直振动平台和摇摆振动平台。

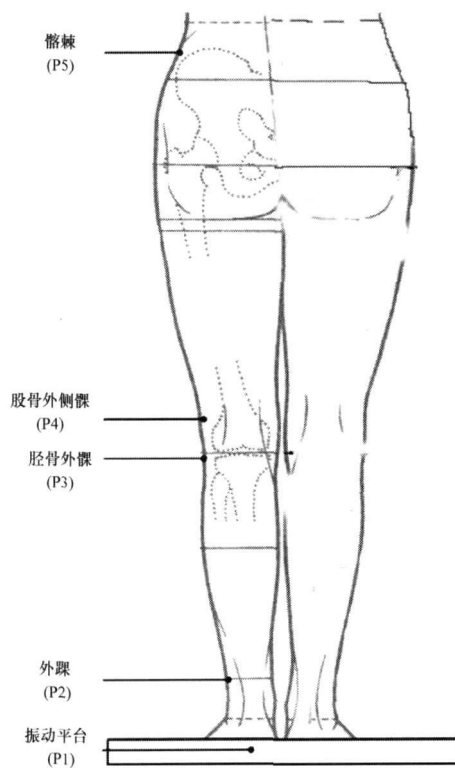


图 1 右下肢标记点位置

Figure 1 Mark distribution on the subjects right lower limb

1.2 实验过程

测试过程中将 Optotrak 测试系统的位移测试传感器固定于受试者右下肢的骨性标志比较明显的位置, 外踝 (lateral malleolus)、胫骨外髁 (tibial lateral condyle)、股骨外侧髁 (femoral lateral condyle)、髂棘 (iliac crest) 和振动平台, 如图 1 中的标记点。标记点按照解剖学依据布置在受试者下肢骨性标志比较明显的部位。每个标记点的采样频率设置为 300 Hz。受试者足底振动平台使用垂直振动和摇摆振动两种方式。实验过程中受试者采用三种站立姿势: 膝关节自然条件 (knee relax)、膝关节锁定 (knee lock) 和膝关节固定角度 (knee angle: $160^\circ \pm 2^\circ$)。两种振动使用相同的振动频率 $(29.5 \pm 0.2) \text{ Hz}$,

两脚之间的距离为 25 cm。振动过程中, 每种姿势进行 6 次实验, 要求受试者肩膀保持稳定, 否则重新进行测试。为了减少受试者连续动作的疲劳的影响, 实验采集过程中安排有休息时间。

1.3 数据处理

实验过程中采集的位移数据为有限离散数据, 必将导致采集信号的能量丢失。数据理论分析表明: 当使用矩形窗进行数据采集时引起的幅值的最大误差为 32.6%; 使用汉宁窗时引起的幅值最大误差为 15.13%, 引起的相位误差为 90°。必须对采集的数据进行处理, 以减小误差。机械工程中使用的全相位能量补偿法, 适用于离散谱的谱分析, 可以将信号分析的幅值减小到 1% 以内而相位误差减小到 10°。由于本实验过程中使用振动激励的频率是特定的频率值, 因此采集的数据的频谱为离散谱, 因此可以使用全相位能量补偿法进行数据处理。对振动平台的输入激励信号和受试者标记点的信号进行频谱分析, 结果如图 2 所示。

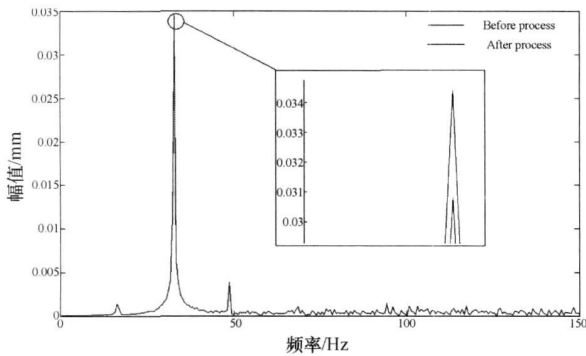


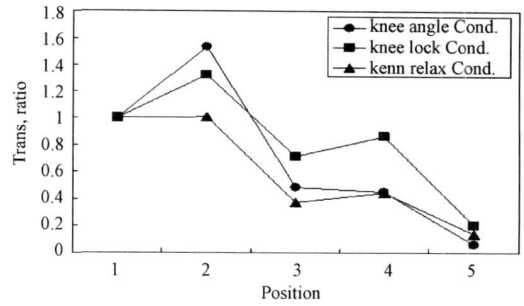
图 2 采集信号处理前后频谱图

Figure 2 Frequency domain curves of the extramalleolus mark before and after processing

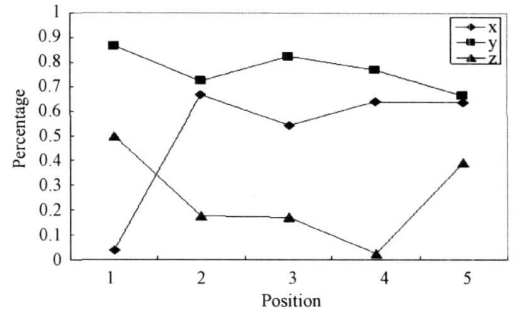
2 结果

2.1 摇摆振动条件下的振动传递分析

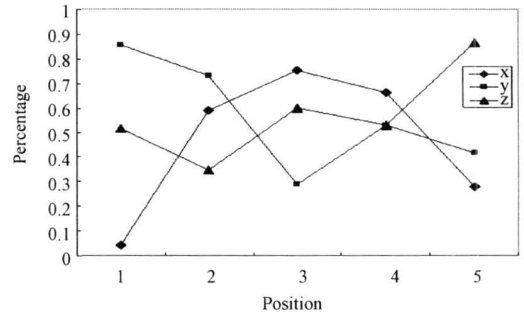
分析过程将振动平台、试者右下肢脚外踝、胫骨外踝、股骨外踝、髂棘处的标记点定义为 P₁、P₂、P₃、P₄ 和 P₅。则以振动平台 P₁ 的加速度为参考点, 各点振动加速度比及各点加速在 x、y 和 z 轴方向 (图 1) 的分配比见图 3。图 3 中, 图 (a) 为摇摆振动条件下三种姿势不同测点的振动传递比; 图 (b)、(c) 和 (d) 分别为膝关节固定角度、膝关节锁定和膝关节自然条件下各个测点加速度在 3 个轴向上的分布图。图 3 中横坐标的 1、2、3、4、5 对应于实验中的标记点 P₁、P₂、P₃、P₄、P₅。



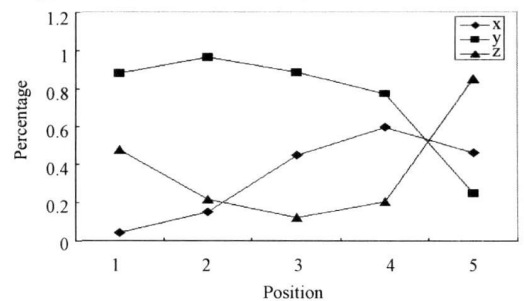
(a) 不同姿势下各点振动传递比曲线



(b) 膝关节固定角度下各点加速度在 x、y、z 方向的加速度分配图



(c) 膝关节锁定下各点加速度在 x、y、z 方向的加速度分配图



(d) 膝关节自然条件下各点加速度在 x、y、z 方向的加速度分配图

图 3 摇摆振动条件下各个测点振动传递比及在 x、y、z 方向的加速度分配图

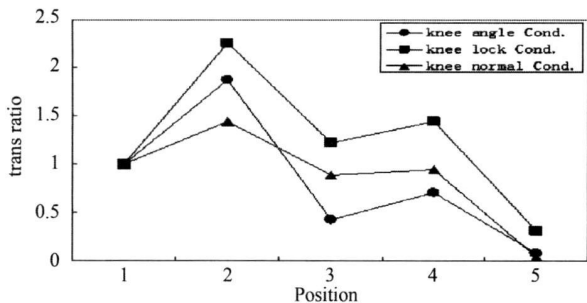
Figure 3 Total acceleration curves of the marks and the curves of the acceleration divided in x, y and z axis directions with three different postures under swing

由图 3 可以看出, 三种不同方式踝关节处的传递较大; 膝关节锁定姿势时传递至膝关节的振动较其他两种方式要大; 膝关节固定角度时振动的分配主要集中在 x、y 两个方向; 膝关节自然条件时踝关节和膝关

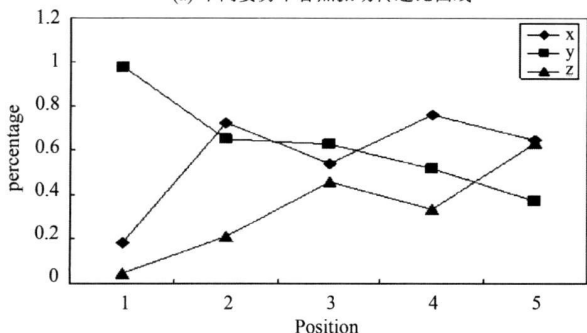
节的振动能量主要分布于 y 方向上; 摇摆振动过程中, 不同的姿势对振动在各个轴向分配影响较大。

2.2 垂直振动条件下的振动传递分析

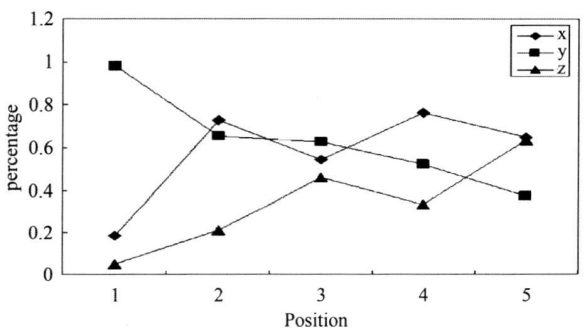
垂直振动过程中的标记点及其设定与摇摆振动相同, 其分析结果如图 4。图中横坐标的 1~5 对应



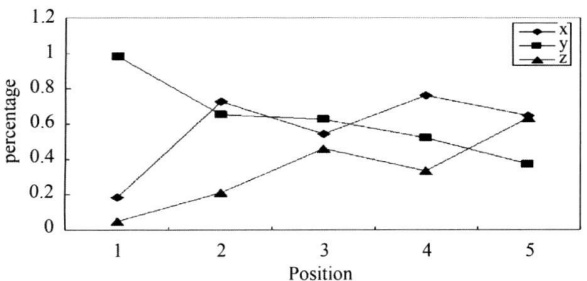
(a) 不同姿势下各点振动传递比曲线



(b) 膝关节固定角度下各点加速度在 x、y、z 方向的加速度分配图



(c) 膝关节锁定下各点加速度在 x、y、z 方向的加速度分配图



(d) 膝关节自然条件下各点加速度在 x、y、z 方向的加速度分配图

图 4 垂直振动条件下各个测点振动传递比及在

x、y、z 方向的加速度分配图

Figure 4 Total acceleration curves of the marks and the curves of the acceleration divided in x, y and z axis directions with three different postures under vertical vibrations

于实验中的标记点 P1 ~ P5。由图 4 可以看出, 三种不同方式踝关节处的传递较大; 膝关节锁定姿势时传递至膝关节的振动较其他两种方式要大; 三种振动方式中膝关节锁定姿势时的振动加速度最大而膝关节固定角度最小; 膝关节自然条件姿势时踝关节和膝关节的振动能量主要分布于 y 方向上。

2.3 对比分析

对比分析两种振动在相同条件下的加速度可以看出, 在相同振动频率下摇摆振动时各个测点的加速度远大与垂直振动条件的加速度。振动在受试者下肢的传递过程中, 无论是摇摆振动还是垂直振动, 脚踝处的传递比较大。表 1 为摇摆振动和垂直振动时三种不同姿势 6 次实验的数据统计。由表 1 可以看出, 垂直振动过程中的振动传递变化较小; 摇摆振动过程中的振动传递较大。

表 1 摇摆、垂直振动传递比数据

Table 1 Transmission of the marked points with swing and vertical vibration

姿态	位置	摇摆振动			垂直振动		
		传递比 (R)	a _{a/R}	b _{b/R}	传递比 (R)	a _{a/R}	b _{b/R}
膝关节固定角度	P2	1.5315	0.0692	-0.0804	1.8228	0.0665	0.0061
		4.52%	-5.25%	3.65%	0.33%		
	P3	0.4849	0.0575	-0.1146	0.4447	0.0516	-0.088
		11.86%	-23.63%	11.60%	-19.79%		
	P4	0.4549	0.0369	-0.047	0.7426	0.0811	-0.1688
8.11%		-10.33%	10.92%	-22.73%			
P5	0.0613	0.0065	-0.0052	0.0796	0.0016	-0.001	
		10.60%	-8.48%	2.01%	-1.26%		
膝关节锁定	P2	1.3191	0.083	-0.1961	2.2566	0.1059	-0.2826
		6.29%	-14.87%	4.69%	-12.52%		
	P3	0.7114	0.0526	-0.077	1.2243	0.0566	-0.1177
		7.39%	-10.82%	4.62%	-9.61%		
	P4	0.8632	0.0975	-0.2167	1.8468	0.1191	-0.1202
11.30%		-25.10%	6.45%	-6.51%			
P5	0.2051	0.0287	-0.061	0.3116	0.0837	-0.098	
		13.99%	-29.74%	26.86%	-31.45%		
膝关节自然条件	P2	1.0076	0.1735	-0.108	1.4205	0.1261	-0.1108
		17.22%	-10.75%	8.88%	-7.80%		
	P3	0.3747	0.0692	-0.0854	0.8891	0.0946	-0.0395
		18.47%	-22.79%	10.64%	-4.44%		
	P4	0.4424	0.0446	-0.0401	0.9407	0.0678	-0.0801
10.08%		-9.06%	7.21%	-8.51%			
P5	0.1359	0.0012	-0.0023	0.0464	0.0056	-0.0039	
		0.88%	-1.69%	12.07%	-8.41%		

3 结论

本研究中应用两种摇摆和垂直两种振动激励以

及三种站立姿势观察振动在人体下肢的传递情况。分析结果表明,相同振动频率条件下摇摆振动加速度远远大于垂直振动加速度;在不同站立姿势情况下振动的传递也不相同,总体来讲垂直振动受试者下肢的传递比较摇摆振动的传递比要大;相同的站姿条件下垂直振动的传递较摇摆振动的传递要稳定。本文的研究对于深入了解全身振动对人体的效应有一定的借鉴作用。

参考文献

[1] Torvinen S, Kannus P, Sievanen H et al. Effect of a vibration exposure on muscular performance and body balance: Randomized cross-over study[J]. *Clin Physiol & Func In* 2002 22(1): 145—152

[2] Torvinen S, Sievanen H, Jarvinen TAH et al. Effect of 4—min vertical whole body vibration on muscle performance and body balance: A randomized cross-over study[J]. *Int J Sport Med* 2001 23: 374—379

[3] Torvinen S, Kannus P, Jarvinen TAH et al. Effect of four-month vertical whole body vibration on performance and balance [J]. *Med Sci Sport Exerc* 2002 34: 1523—1528

[4] Torvinen S, Kannus P, Sievanen H et al. Effect of 8—month vertical whole body vibration on bone, muscle performance and body balance: A randomized controlled study[J]. *J Bone Miner Res* 2003 18(2): 297—312

[5] Cosimo RR, Fulvio L, Stefania B et al. High-frequency vibration training increases muscle power in postmenopausal women[J]. *Arch Phys Med Rehabil* 2003 84: 1854—1857.

[6] Rubin C, Recker B, Cullen D et al. Prevention of postmenopausal bone loss by a low-magnitude high-frequency mechanical stimuli: a clinical trial assessing compliance, efficacy and safety[J]. *J Bone Miner Res* 2004 19: 343—351.

[7] Kate W, Chrissie A, Janette C et al. Low magnitude mechanical loading is osteogenic in children with disabling conditions[J]. *Journal of Bone and Mineral Research* 2004 19(3): 360—369.

[8] Rubin C, Tumer AS, Muller R et al. Quantity and quality of trabecular bone in the femur are enhanced by a strongly anabolic noninvasive mechanical intervention[J]. *J Bone Miner Res* 2002 17: 349—357.

[9] Judex S, Zemcke RF. High-impact exercise and growing bone: relation between high strain rates and enhanced bone formation [J]. *J Appl Physiol* 2000 88: 2183—2191.

[10] Judex S, Boyd S, Qin YX et al. Adaptations of trabecular bone to low magnitude vibrations result in more uniform stress and strain under load[J]. *Ann Biomed Eng* 2003 31: 12—20.

[11] Lamothe M, Zemcke RF. Rest insertion combined with high-frequency loading enhances osteogenesis[J]. *J Appl Physiol* 2004 96: 1788—1793.

(2009—03—03 收稿)

(上接第 596 页)

参考文献

[1] de Zelicourt DA, Kerem Pekkap, James Parks et al. Flow study of an extracardiac connection with persistent left superior vena cava. *The journal of thoracic and cardiovascular surgery* 2006 131(4): 785—791.

[2] 张陈. Fontan 手术的危險因素. *国外医学儿科学分册*, 2005 32(2): 127—129.

[3] DeGroot C, Bimbaun B, Shandas R et al. Computational simulations of the total cavopulmonary connection: insights in optimizing numerical solutions. *Medical Engineering & Physics* 2005 27(2): 135—146.

[4] Qi Sup, Dawei Wang, Jinfen Liu et al. Influence of antegrade pulmonary blood flow on the hemodynamic performance of bidirectional cavopulmonary anastomosis: A numerical study. *Medical Engineering & Physics* 2009 31(2): 227—233.

[5] 杨振森, 李传富, 周源康, 等. 一种基于水平集的前列腺超声图像自动分割算法. *北京生物医学工程*, 2009 28(1): 17

—21.

[6] 罗述谦, 周果宏. *医学图像处理与分析*. 北京: 科学出版社, 2003.

[7] Zheng YJ. A survey on evaluation methods for image segmentation[J]. *Pattern Recognition* 1996 29(8): 1335—1346.

[8] 聂斌. 医学图像分割技术及其进展. *泰山医学院学报*, 2002 23(4): 422—426.

[9] 徐凯, 裴国献, 等. 基于 Amira 软件的小腿外侧供区皮瓣三维可视化设计. *解放军医学杂志*, 2007 32(7): 701—703.

[10] *Amira 4.1 Users Guide*

[11] Kerem Pekkap, Brian White, Kirk Kanter et al. Patient specific surgical planning and hemodynamics computational fluid dynamics optimization through free-form haptic anatomy editing tool (SURGEM). *Med Biol Eng Computer* 2008 46(11): 1139—1152.

(2009—04—15 收稿, 2009—07—15 修回)