

穿斗式木构架抗震特性分析

黄舜* 傅宇光

(同济大学建筑工程系, 上海 200092)

摘要 对穿斗式木构架结构部件组成、房屋结构尺寸设计、施工工艺、结构受力等进行了分析。在此基础上,建立了穿斗式木构架房屋的抗震计算模型,进行了地震荷载作用下的结构时程动力计算,研究并分析了此类结构形式的抗震性能。分析结果表明:穿斗式木构架最大位移响应是随着榫卯节点刚度的增加而减小的,随着输入地震波加速度峰值增大,榫卯节点刚度变化对木构架中柱柱顶位移峰值的影响也逐渐增大。

关键词 穿斗式木构架, 数值模型, 抗震特性, 动力时程分析

Study of Seismic Characteristic of a Chuan-dou Style (or Column and Tie Joint) Wood Frame House

HUANG Shun* FU Yuguang

(Department of Building Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract In this paper, the structural components, construction technology and structural capacity of the Chuan-Dou style (or column and tie joint) wood frame houses were summarized and analysed. A FE model was established for a Chuan-Dou style wood frame house. The time dynamic response analysis of the structures under seismic input was executed. The seismic performance of such a wood frame houses was investigated. Analyses showed that the max displacement of the Chuan-Dou style wood frame house decreases when the stiffness of the tenon joint nodes increases. With the increase of the max value of the input accelerations of the seismic waves, the influence of the the tenon joint node stiffness increases on the column top displacement of the wood frame house.

Keywords chuan-dou style wood frame, numerical model, seismic performance, dynamic time-history analysis

1 引言

穿斗式木构架房屋是我国传统建筑结构形式之一,在我国广大农村其应用依然非常普遍,其穿枋与柱子的连接依靠榫卯节点,为半刚性连接。2008年5月12日,四川汶川发生里氏8.0级特大地震,灾区许多建筑物受到严重破坏,但穿斗式木构架体现出了较好的抗震性能^[1,2]。穿斗式木构架以每个檩子下用支柱支撑为原则,穿枋连接横

向柱子成排架,斗枋连接纵向柱子,檩子上是椽子,椽子上是瓦片。屋顶重量通过椽子、檩子和支柱到达地面。

本文研究穿斗木结构房屋的抗震性能,通过建立有限元计算模型,分析研究结构特征和动力性能,以供穿斗木结构房屋的建造和维护加固作参考。

2 穿斗式木构架房屋数值模拟

采用SAP2000分析模型,结构及构件材料属性分

别定义为各向同性、正交各向异性和各向异性^[3,4]。

2.1 房屋结构计算模型为

其横向柱子由穿枋连接,纵向柱子由斗枋连接,柱、枋采用直榫连接。模型木柱安放在带凹孔的混凝土基座内^[5,6],木板墙体通过抱柱与柱子连接,通过榫卯与上下穿枋连接。在数值模拟中,柱、枋选用线单元模拟,墙体选用壳单元模拟,柱、枋之间的榫卯节点采用连接单元模拟。数值模型采用 1/2 缩尺模型,尺寸如图 2 所示。墙体根据其几何和受力特点选用四节点的四边形单元模拟。

2.2 框架单元的计算参数为

截面几何尺寸如表 1 所示。木材弹性模量 E 、密度 ρ 、泊松比 μ 等按照含水率 10% 的杉木取值: $\rho = 269 \text{ kg/m}^3$, $E_1 = 12\,200 \text{ MPa}$, $E_2 = 1\,220 \text{ MPa}$, $E_3 = 610 \text{ MPa}$, $\mu_{12} = 0.37$, $\mu_{13} = 0.47$, $\mu_{23} = 0.43$, $G_{12} = 915 \text{ MPa}$, $G_{13} = 732 \text{ MPa}$, $G_{23} = 219.6 \text{ MPa}$ 。其中,下标 1、2 和 3 分别为木材的 L、T 和 R 方向(图 1)。

表 1 构件尺寸

Table 1 Size of the elements

构件	截面形式	尺寸/mm
地脚枋	矩形	50 × 100
穿枋		50 × 100, 50 × 110, 50 × 75
柱	圆形	$D = 80$
檩		$D = 70$

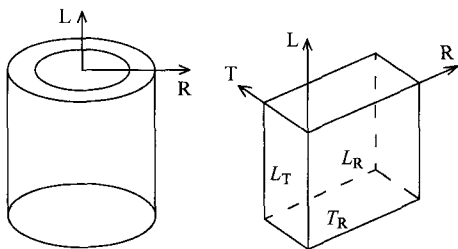


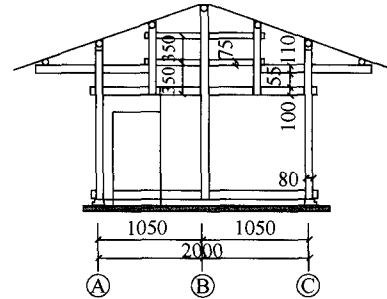
图 1 木材正交三向轴图

Fig. 1 The orthogonal three-axis of the wood

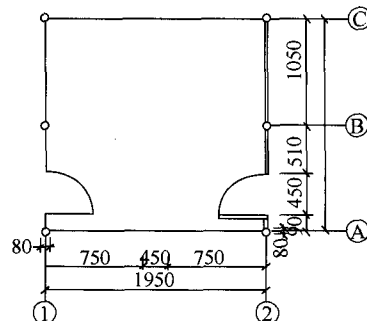
连接单元的属性假定由 6 个内部“弹簧”组成,依次对应每个内部自由度。图 3 显示了弹簧的轴向、剪切和纯弯的 3 种变形,其中,剪切和纯弯位于 1-2 平面内。其他 3 个没有显示的弹簧的变形方式为位于 1-3 平面内的扭转、剪切和纯弯。模型采用多段线性随动硬化塑性属性。



(a) 试验模型



(b) 结构立面



(c) 结构平面

图 2 模型构件尺寸及布置

Fig. 2 Model size and structural element arrangement

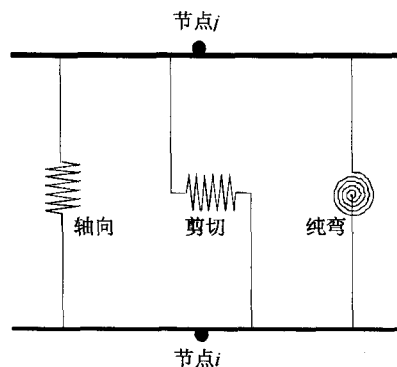


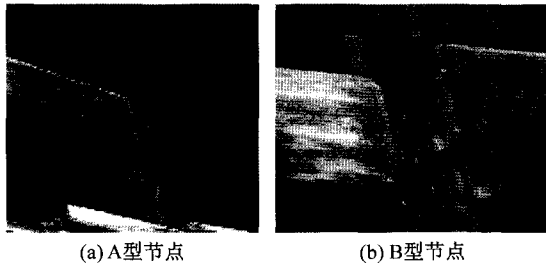
图 3 连接单元中的 3 个非线性弹簧

Fig. 3 Three nonlinear springs of the connecting unit

房屋的所有榫卯节点简化分为 A 型节点和 B 型节点,如图 4 所示。

榫卯节点的半刚性性质已得到广泛认同^[7]。在数值模拟时对此连接的模拟均为引入无质量、无尺寸的虚拟单元加在梁单元的两端。数值模拟中节点采用连接单元 MultiLinear Plastic, 轴向和

侧向刚度取以往研究中采用的较大刚度值 10^9 N/mm; 扭转刚度根据文献有限元分析^[8]得到的弯矩-转角关系图中的三个关键点分别确定(表 2), 采用交互方式输入 SAP2000 程序中, 并选取 Kinematic 模型分析。



(a) A型节点 (b) B型节点

图 4 穿斗式木构架房屋榫卯节点

Fig. 4 Tenon joints of the Chuan-Dou style wood frame house

表 2 榫卯节点的弯矩-转角曲线特征点

Table 2 Key points of the moment-rotation curve in tenon joints

关键点	类型	转角/rad	弯矩/(N·mm)
第一点	A 型	0.009	43 128
	B 型	0.009	47 618
第二点	A 型	0.018	292 649
	B 型	0.023	338 390
第三点	A 型	0.106	467 626
	B 型	0.112	468 034

地震作用下, 若地震水平加速度小于 μ mg (μ 为静摩擦系数, 不考虑竖向地震影响), 柱与柱础间无滑移; 反之, 柱脚会相对柱基础发生水平滑移。柱根与基础石间摩擦系数取 0.6。模型上部结构总重约为 1 500 N, 数值模拟时, 用连接弹簧模拟柱脚与柱础间滑移作用, $f = kx$, 其中, k 为弹簧刚度系数, x 为位移。假定 x 为单位位移, 则 $f = k$, 且分配到每一根柱子上的摩擦力 $f' = 1/6f$, 代入数据, 得 $k = 150$ N/mm。将柱脚处支座约束简化为固定铰支座。木结构阻尼比取 0.02。

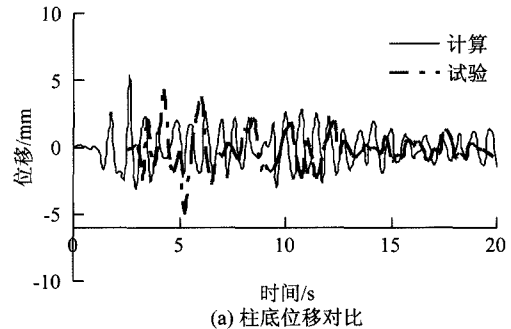
结构整体数值模拟采用非线性动力时程计算方法, 加载地震波与试验相同, 采用 1940 年美国加州地震 El-Centro 波, 分 0.1 g、0.2 g、0.3 g、0.4 g 和 0.5 g 共 5 个工况加载。计算完成后提取前 6 阶模态, 结果如表 3 所示。

图 5-图 7 为不同峰值加速度输入下中柱位移的数值模拟值与试验值的比较。表 4 为相应水平地震波下, 中柱位移最大值的计算结果与试验值的比较。计算结果和试验基本吻合。本文通过测量柱底、柱顶的位移峰值来评价结构在不同加速度下的地震响应。

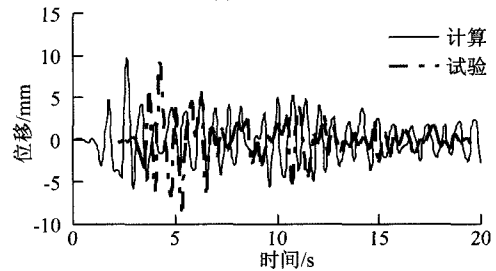
表 3 穿斗式木构架自振周期及频率

Table 3 Vibration periods and frequencies of the Chuan-Dou style wood frame house

模态阶数	固有周期/s	固有循环频率/Hz
1	0.34	2.95
2	0.29	3.45
3	0.28	3.54
4	0.12	8.07
5	0.11	9.28
6	0.10	10.45



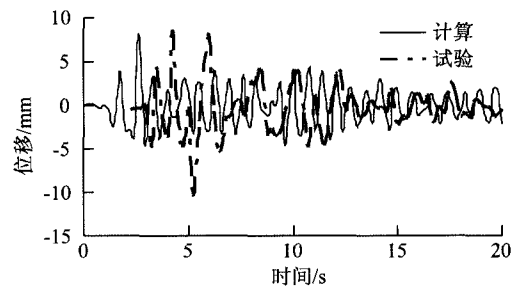
(a) 柱底位移对比



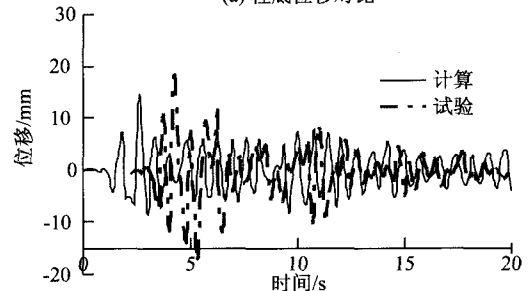
(b) 柱顶位移对比

图 5 0.2 g 输入加速度时中柱位移的比较

Fig. 5 Comparison of the column displacement at the 0.2 g the input acceleration



(a) 柱底位移对比



(b) 柱顶位移对比

图 6 0.3 g 输入加速度时中柱位移的比较

Fig. 6 Comparison of the column displacement at the 0.3 g input acceleration

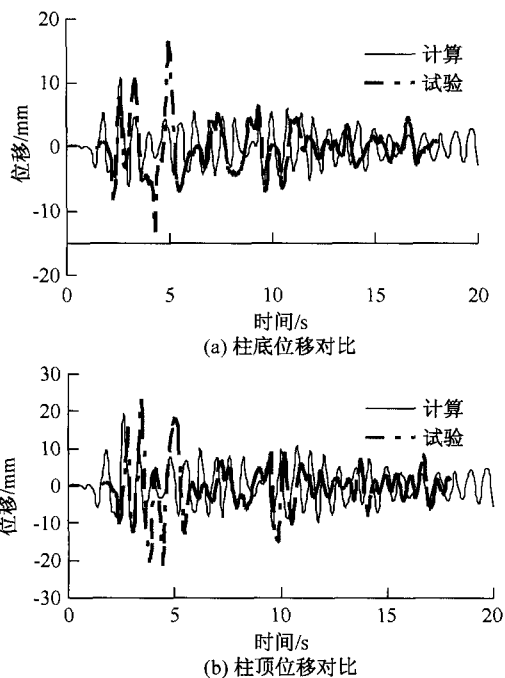


图7 0.4 g 输入加速度时中柱位移的比较
Fig. 7 Comparison of the column displacement at 0.4 g the input acceleration

表4 中柱最大位移比较
Table 4 Comparison of the max column displacement

输入波	输入加速度峰值/g	柱底位移峰值		
		试验/mm	数值模拟/mm	误差
El-Centro	0.1	2.38	2.71	13.90%
	0.2	2.77	5.42	-6.10%
	0.3	10.6	8.13	-23.30%
	0.4	16.73	10.83	-35.30%
	0.5	15.57	13.62	-30.40%
输入波	输入加速度峰值/g	柱底位移峰值		
		试验/mm	数值模拟/mm	误差
El-Centro	0.1	4.65	4.87	4.70%
	0.2	10.01	99.74	-2.70%
	0.3	19.1	14.6	-23.60%
	0.4	25.95	19.47	-25.00%
	0.5	28.99	24.34	-16.00%

3 榫卯节点对结构地震反应影响分析

前述数值模拟中榫卯节点采用 MultiLinear Plastic 连接单元^[9],其弯矩-转角关系考虑非线性。为简化计算,以线性连接单元代替非线性连接单元,并对比分析两种节点模拟方式对整个穿斗式木构架结构的差异。线性连接单元转动刚度以 A、B 型节点刚度平均值为依据,取弯矩-转角

关系中加载前半段刚度 $1.4 \times 10^7 \text{ N} \cdot \text{mm}/\text{rad}$ 。采用线性连接单元与非线性连接单元两种计算模型得到的位移时程见图 8。线性和非线性连接单元模型计算结果之比显示:两种模型计算的位移时程几乎无差别。比较结果表明,在适当选取榫卯节点转动刚度的情况下,将非线性连接单元简化为线性连接单元模拟计算可满足精度要求。

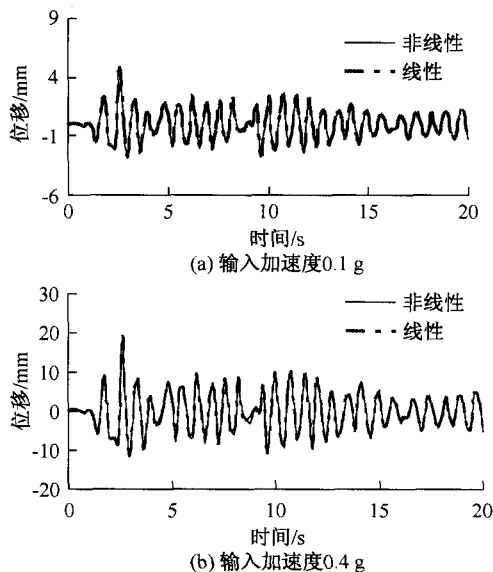


图8 0.1 g, 0.4 g 工况线性和非线性连接单元模型计算的柱顶位移比较

Fig. 8 Comparison of the column top displacement for linear and nonlinear joints (0.1 g, 0.4 g)

为了解榫卯节点转动刚度与穿斗式木构架自振频率的关系,改变节点转动刚度,计算木构架相应自振频率,可得到木构架自振频率随节点转动刚度的变化情况,见图 9。

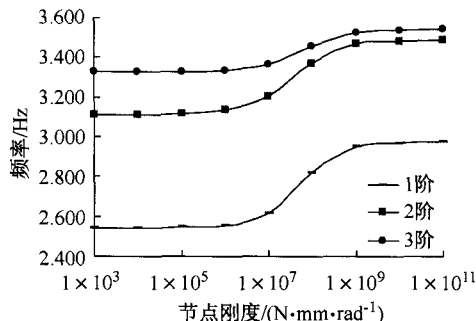


图9 穿斗式木构架自振频率随节点转动刚度变化
Fig. 9 The variation of natural vibration frequencies at different rotational node stiffness in the chuan-dou style wood frame house

计算结果显示(图 9),榫卯节点接近于铰接

时(转动刚度为 $10^3 \text{ N} \cdot \text{mm}/\text{rad}$)与榫卯节点接近于固接时(转动刚度为 $10^{11} \text{ N} \cdot \text{mm}/\text{rad}$)穿斗式木构架前 3 阶自振频率分别相差 0.43 Hz、0.37 Hz 和 0.22 Hz。穿斗式木构架自振频率随榫卯节点刚度变化而变化,榫卯节点刚度为 $10^7-10^9 \text{ N} \cdot \text{mm}/\text{rad}$ 的范围内,自振频率随节点刚度变化较敏感,木构架自振频率随节点刚度变化迅速变化,此范围之外,木构架自振频率变化小。

为研究榫卯节点转动刚度对穿斗式木构架地震反应的影响,在 $10^3-10^9 \text{ N} \cdot \text{mm}/\text{rad}$ 范围内改变榫卯节点转动刚度,以 EL-Centro 波为加载地震波进行 0.1 g、0.3 g、0.5 g 共 3 个工况的动力时程分析。

图 10 为计算所得各工况下穿斗式木构架中柱柱顶位移峰值随榫卯节点转动刚度变化情况,图 11 为计算所得各工况下穿斗式木构架中柱柱顶加速度峰值随榫卯节点转动刚度变化情况。

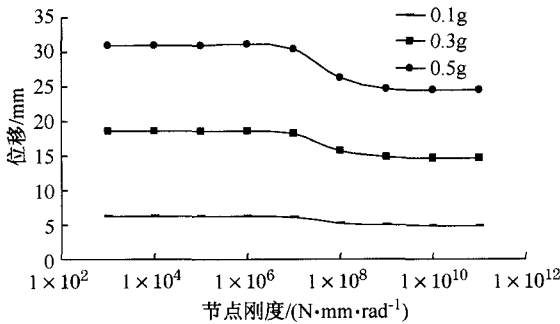


图 10 中柱柱顶位移峰值随节点转动刚度变化情况
Fig. 10 Column top displacement variation at the different nodal rotational stiffness

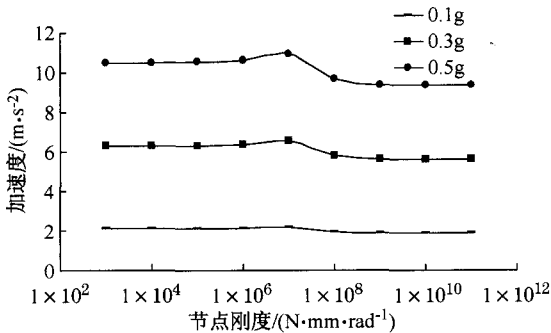


图 11 中柱柱顶加速度峰值随节点转动刚度变化情况
Fig. 11 The column top acceleration variation at different nodal rotational stiffness

由图 10 可知:①穿斗式木构架地震反应最大位移总趋势为随榫卯节点刚度增加而减小,木构

架最大位移随节点刚度变化存在一敏感区,榫卯节点刚度为 $10^7-10^9 \text{ N} \cdot \text{mm}/\text{rad}$ 的区段中,木构架最大位移随节点刚度增大而迅速减小;敏感区以外,木构架最大位移随节点刚度增大而缓慢减小或保持稳定。②随着输入地震波加速度峰值的增大,榫卯节点刚度变化对穿斗式木构架中柱柱顶位移峰值的影响逐渐增大。

从图 11 可知:①输入地震波加速度峰值为 0.1 g 的工况下,穿斗式木构架中柱柱顶最大加速度随榫卯节点转动刚度增大而增大;②输入地震波加速度峰值为 0.3 g 和 0.5 g 的工况下,穿斗式木构架中柱柱顶最大加速度随榫卯节点转动刚度的增大先增大后减小,存在峰值。可能是因穿斗式木构架自振周期与地震波频谱出现耦合导致。③节点是否破坏可以通过测量节点的极限弯矩来进行评判。除了构架的加速度以外,若中柱的柱顶、柱底的相对位移角过大,则也可以此分析房屋的破坏,总结破坏特征。

4 结 论

(1) 在适当选取榫卯节点转动刚度的情况下,将非线性连接单元简化为线性连接单元模拟计算可满足精度要求。

(2) 穿斗式木构架自振频率随榫卯节点刚度的变化而变化,且存在一敏感区。敏感区内,木构架自振频率随节点刚度变化而迅速变化;敏感区外,木构架自振频率变化小,基本等于节点铰接或固接时木构架的自振频率。

(3) 穿斗式木构架地震反应最大位移随榫卯节点刚度增加而减小,且当输入地震波加速度峰值增大时,节点刚度变化对穿斗式木构架中柱柱顶位移峰值的影响逐渐增大。

致谢 本课题由上海市大学生创新训练计划资金支持,由同济大学陈世鸣教授悉心指导,在此谨向陈老师及同济大学上海市大学生创新训练计划致以谢意!

参考文献

[1] 同济大学土木工程防灾国家重点实验室. 汶川地震震害研究 [M]. 上海:同济大学出版社,2011.
State Key Laboratory for Disaster Reduction in Civil Engineering, Tongji University. Analysis of the characteristics of the great Wenchuan earthquake [M].

- Shanghai: Tongji University Press, 2011. (in Chinese)
- [2] 吕西林, 李建中, 唐益群, 等. 5·12汶川地震后同济大学技术人员在四川广元房屋应急评估工作概况及体会[J]. 结构工程师, 2008, 24(3):1-2.
- Lu Xilin, Li Jianzhong, Tang Yiqun, et al. Summary and comments on building damages by Sichuan 5·12 earthquake based on site urgent structural evaluation. [J]. Structural Engineers, 2008, 24(3):1-2. (in Chinese)
- [3] CSI公司. CSI分析参考手册[M]. 2004.
- Computers and Structures Inc. CSI analysis reference manual [M]. 2004. (in Chinese)
- [4] 北京金土木软件技术有限公司. SAP2000中文版使用指南[M]. 北京:人民交通出版社, 2009.
- Beijing Civil King Software Technology Co., Ltd. User guide for SAP2000 (Chinese version) [M]. Beijing: China Communications Press, 2009. (in Chinese)
- [5] 黄玲, 陈世鸣. 穿斗式木构架房屋中的榫卯节点性能研究[J]. 中国科技论文在线, 2011.
- Huang Ling, Chen Shiming. Study of mechanical performance of tenon and mortise joint in chuan dou-style (or column and tie joint) wood [J]. Sciencepaper Online, 2011. (in Chinese)
- [6] 黄曙. 农村典型木结构房屋的抗震性能及加固措施研究[D]. 长沙:湖南大学, 2009.
- Huang Shu. Study on the seismic behaviors and strengthening measures of typical rural wooden house [D]. Changsha: Hunan University, 2009. (in Chinese)
- [7] 赵正易, 化明星. 印尼木结构房屋连接概述[J]. 结构工程师, 2012, 28(5):177-182.
- Zhao Zhengyi, Hua Mingxing. Introduction to Indonesia wood structure connections [J]. Structural Engineers, 2012, 28(5):177-182. (in Chinese)
- [8] 黄玲. 穿斗式木构架房屋抗震性能研究[D]. 上海:同济大学, 2011.
- Huang Ling. Study on seismic performance of chuan dou-style (column and tie joint) wood frame house [D]. Shanghai: Tongji University, 2011. (in Chinese)
- [9] 邓大利, 陆伟东, 居兴鹏. 木结构榫卯节点耗能加固有限元分析[J]. 结构工程师, 2011, 27(4):62-66.
- Deng Dali, Lu Weidong, Ju Xinpeng. Finite element analysis of energy dissipation reinforcement for mortise and tenon joints [J]. Structural Engineers, 2011, 27(4):62-66. (in Chinese)