

杨木单板条层积材的蠕变性能分析

陈晓艳¹, 孙丹丹¹, 王志鹏¹, 张海洋², 卢晓宁^{2*}

(1. 宿迁市产品质量监督检验所, 江苏 宿迁 223800; 2. 南京林业大学 木材工业学院, 江苏 南京 210037)

摘 要:采用三点弯曲的方法对杨木单板条层积材进行了 30% 和 40% 2 个应力水平的蠕变试验, 并用四元件 Burger 模型对蠕变数据进行拟合。结果表明, 四元件 Burger 模型很适合用于描述杨木单板条层积材的蠕变变形, 且随着应力水平的增加, PSL 的瞬时弹性变形增加。

关键词:杨木; 单板条层积材; 蠕变; Burger 模型

中图分类号: S781.21 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-7461(2014)04-0203-05

Creep Behavior of Poplar Parallel Strand Lumber

CHEN Xiao-yan¹, SUN Dan-dan¹, WANG Zhi-peng¹, ZHANG Hai-yang², LU Xiao-ning^{2*}

(1. Suqian Product Quality Supervision and Testing Institute, Suqian, Jiangsu 223800, China;

2. College of Wood Science and Technology, Nanjing Forestry University, Nanjing, Jiangsu 210037, China)

Abstract: Creep behaviors of of poplar parallel strand lumber (PSL) under the loads of 30% and 40% were tested. The resultant data were analyzed by Burger model. The results indicated that the Burger model was suitable to describe the creep behaviors of poplar PSL, and the instantaneous elastic behavior would increase with the increase of loads.

Key words: poplar; parallel strand lumber (PSL); creep; Burger model

随着人们对生活质量的要求越来越高, 木结构建筑也越来越受到人们的喜爱, 结构用材在今后将会有广阔的发展前景。然而目前世界森林总面积仅略超过 40 亿 hm^2 , 相当于人均 0.6 hm^2 ^[1]。大径级天然木材日渐短缺, 取而代之的是人工速生林小径级木^[2]。据研究, 林木受到的竞争强度随着径级的增大而逐渐减小; 随着林分密度增大, 林木各径级受到的竞争强度也随之增大^[3]。为了提高木材的综合利用率, 人们考虑将小径级速生材旋切后产生的单板条铺装热压, 制成单板条层积材作为结构材料使用。单板条层积材(PSL)是由窄单板条沿木纤维长度方向铺装成型的一种新型木质复合材料, 它对原材料的要求很低, 速生材、劣质材和生产胶合板的剩余物均可作为其生产原材料。生产的单板条层积材可制成较长的建筑构件, 用于建筑托梁、内部墙壁支柱和门框窗框、楼梯扶手等部件^[4]。但是单板条层

积材作为构件在使用时, 其内部不仅产生应力, 而且还会产生蠕变, 既影响构件的正常使用, 又会减少耐久性。

关于木材蠕变性能的研究, 早在 20 世纪 50 年代, 日本及欧洲的一些国家就已经开始了。当时由于理论的限制, 研究中描述蠕变特性多以图表或回归线为主, 在使用和研究上都是相当的不便。20 世纪 60 年代粘弹性理论问世以后, 有些学者开始利用粘弹性模型来揭示蠕变特性, 不过那时只是预先确定好了模型元件和元件常数来定性分析蠕变和应力松弛。随后, 日本掠代等人提出根据蠕变及蠕变回复的实测结果, 进行确定模型元件数和元件常数。1982 年, 日本松上等人提出可以根据短时间内测得的蠕变结果来确定蠕变常数, 这就节约了大量的测试时间。1992 年, Fridley 通过实验改进四元件模型, 使之含有负载、湿度和温度的共同影响。1994

收稿日期: 2013-08-28 修回日期: 2013-12-13

基金项目: 江苏省苏北科技发展规划项目(BC2012417)。

作者简介: 陈晓艳, 女, 工程师, 研究方向: 建材产品检验。E-mail: cxy20001@163.com

* 通信作者: 卢晓宁, 男, 教授, 博士生导师, 研究方向: 木材科学。E-mail: luxiaoning@njfu.edu.cn

年,Sarnsrdinghe 研究木材长期蠕变性能^[5]。1997 年,Bond 应用时间温度叠加原理建立了木材长期蠕变模型。同年,Y. H. Shen^[6]等研究了自然环境条件下结构材的蠕变性能,结果表明,梁的刚性对其蠕变变形的大小有影响,而蠕变变形与环境温度的波动有密切的关系,并建立了一个相应的四元件模型。1998 年,A. Hanhijarivi^[7]研究了木材粘弹性与含水率之间的关系,并指出高含水率会使木材蠕变加速。

国内对于木材蠕变的研究也有所开展^[8]。1987 年,东北林业大学张斌等人也研究了根据短时间内木材弯曲蠕变试验曲线来确实流变模型元件数和元件常数方案,指出弯曲蠕变试验应用 6 个元件模型为宜,木材抵抗蠕变能力除了与开尔文体平衡柔度有关外,还和马克思维尔体的粘性系数有关。1992 年,东北林业大学李静辉等人研究了受剪薄木在变载下的挠度问题,通过蠕变试验资料的计算,预测木材在变载作用下粘弹性应变的变化规律,研究中还采取了广义的 Kelvin 模型,其精确性主要取决于匹配的两个试验试件之间的蠕变模型常数的差别,即取决于蠕变试验试件与变载试验试件^[9]。同时指出,蠕变研究不仅是物理理论基础的研究范围,而且对木材加工以及结构材料的耐久性也是非常重要的。那斌^[10]等对速生杨木素板进行改性,测量改性后杨木的蠕变性能。2002 年徐咏兰^[11]等对意杨单板层积材的蠕变特性、弹性模量以及静曲强度进行了研究。贾娜^[12]等对单板层积材弯曲蠕变应力水平的相关性进行了试验研究。吕斌^[13]等对结构胶合板的蠕变测试方法进行了研究,得出了一种较为新颖的蠕变测试方法——应变测试法。

目前,已经进行过蠕变性能研究的材料有结构胶合板、改性素板、单板层积材等,但是对于单板条层积材的蠕变研究却未见报导。本研究主要应用四元件 Burger 模型研究常温下杨木单板条层积材在应力水平为 30%和 40% 2 种条件下采用三点弯曲时的蠕变变形情况,为今后杨木材料的广泛应用提供依据。

1 材料与 方法

1.1 仪器

万能力学试验机:CMT6104 型,深圳市新三思材料检测有限公司;千分尺:0~25 mm,哈尔滨量具厂;游标卡尺:602-01,哈尔滨量具厂;百分表(磁性表座):0~3 mm,哈尔滨量具厂。

1.2 试件

用脲醛胶压制的杨木单板条层积材,长度为

350 mm,宽度为(50±1) mm,厚度约为 15 mm,共 12 根。其中,单板条沿着层积材长度方向铺装的 6 根(从同一块板上锯制,编号为 P1-P6),单板条方向随机铺装的 6 根(从同一块板上锯制,编号为 R1-R6)。每种铺装方向的板材中有 4 根(P1-P4、R1-R4)用来测定材料的静曲强度和弹性模量,1 根(P5、R5)用来测定应力水平为 30%时的蠕变变形,1 根(P6、R6)用来测定应力水平为 40%时的蠕变变形(表 1)。

表 1 试件的规格尺寸
Table 1 The size of the samples mm

编号	厚度			长度	宽度	跨距
	1	2	平均值			
P1	14.66	14.62	14.64	350	50.32	300
P2	14.63	14.63	14.63	350	50.16	300
P3	14.65	14.65	14.65	350	50.18	300
P4	14.63	14.60	14.62	350	50.92	300
P5	14.65	14.63	14.64	350	50.06	300
P6	14.64	14.64	14.64	350	50.88	300
R1	15.07	15.05	15.06	350	50.56	300
R2	15.06	15.06	15.06	350	50.52	300
R3	15.05	15.05	15.05	350	49.08	300
R4	15.06	15.06	15.06	350	50.84	300
R5	15.08	15.06	15.07	350	50.80	300
R6	15.05	15.05	15.05	350	49.46	300

1.3 试验方法

采用三点弯曲的方法测定杨木单板条层积材的蠕变变形,应力水平选择 30%和 40% 2 种,载荷加于试件的中间,在载荷的正下方放置一个百分表,用于测量试件全过程的变形量,测量数据通过百分表读出^[14]。

首先根据 GB/T 17657-1999《人造板及饰面人造板理化性能试验方法》中规定,将试件置于温度为(20±2)℃、相对湿度为(65±5)%的恒温恒湿环境中。待试件质量恒定之后测定试件的静曲强度和弹性模量,试验时跨距为 $L=20h$,其中 h 为试件的公称厚度。然后将每组试件所测得的静曲强度的平均值作为蠕变试件的静曲强度 σ_b (MPa),根据

$$\sigma_b=\frac{3P_{\max}l}{2bh^2} \tag{1}$$

可得

$$P_{\max}=\frac{2\sigma_bbh^2}{3l} \tag{2}$$

计算出试件所能承受的最大载荷 P_{\max} (N)。式中 l 为 2 支座间的距离(mm), h 、 b 分别为试件厚度和宽度(mm)。

试验在室温的环境中进行,基本条件为:温度 16~25℃,相对湿度 50%~70%。试验前期,每天早、中、晚各测 1 次数值;试验中后期,每天早、晚各

测 1 次数值,试验历时大约 45 d。由于试验中每一个试件的蠕变变形持续的时间比较长,所以本次试验对每 1 个试件只进行 1 次蠕变测量,分析 1 组试验结果。

2 结果与分析

2.1 试件的静曲强度测试及所施加的载荷计算

将试件 P1-P4、R1-R4 放在万能力学试验机上进行静曲强度测试,得出的静曲强度值和最大载荷如表 2 所示。

表 2 试件的静曲强度及最大载荷

编号	静曲强度(σ_b)/MPa		弹性模量 E_b (MPa)	最大载荷 P_{\max} (kN)
	单个值	平均值		
P1	50.93	57.28	7 271.24	1.22
P2	61.77		8 329.78	1.47
P3	56.84		7 644.37	1.36
P4	59.59		7 727.65	1.44
R1	55.39	58.15	6 614.21	1.41
R2	58.61		6 277.99	1.49
R3	61.53		6 445.18	1.52
R4	57.07		6 535.48	1.46

从表 2 中可以得出,平行铺装的杨木单板条层积材的静曲强度为 57.28 MPa,随机铺装的杨木单板条层积材的静曲强度为 58.15 MPa。由此可以计算出进行蠕变测试的试件所能承受的最大载荷以及在本次试验中所应施加的重量(表 3)。

按照表 3 所示 30%和 40%的应力水平分别对试件的蠕变变形进行测试,记录测量时间和所测得的变形值。

2.2 蠕变变形分析

四元件 Burger 模型经转化后可表为^[15]
 $Y(t)=A+B(1-e^{-Ct})+Dt$ (2)
式中: A 为瞬时弹性变形引起的挠度变化, B 为延迟弹性变形引起的挠度变化, C 为粘弹性系数, D 为粘性系数, t 为时间变量。

以时间为横坐标,蠕变变形值为纵坐标,用 Origin 软件分别对 4 个试件的蠕变变形进行拟合,得到的蠕变拟合曲线(图 1~图 4)。

表 3 蠕变试验过程中试件所施加的载荷

编号	静曲强度 /MPa	最大载荷 (P_{\max})/N	30%	40%
			P_{\max}/N	P_{\max}/N
P5	57.28	1 365.62	409.69	—
P6	57.28	1 388.15	—	555.26
R5	58.15	1 490.87	434.31	—
R6	58.15	1 447.69	—	579.08

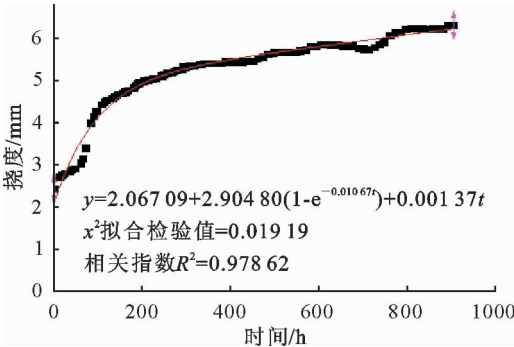


图 1 试件 P5 的蠕变拟合曲线
Fig. 1 The fitted creep curve of P5

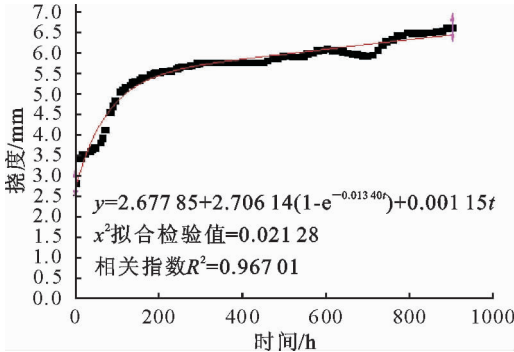


图 2 试件 P6 的蠕变拟合曲线
Fig. 2 The fitted creep curve of P6

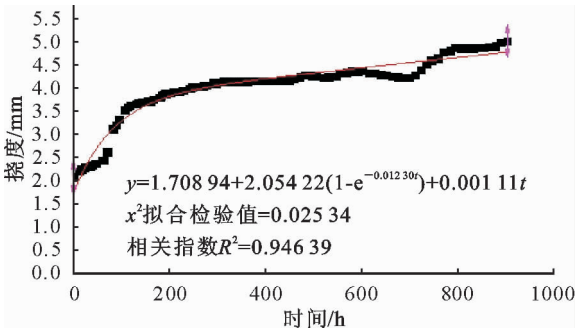


图 3 试件 R5 的蠕变拟合曲线
Fig. 3 The fitted creep curve of R5

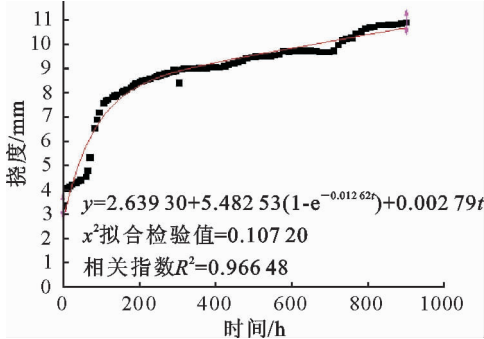


图 4 试件 R6 的蠕变拟合曲线
Fig. 4 The fitted creep curve of R6

从以上 4 个拟合图中可以看出,经 χ^2 拟合检验的 χ^2 值均比较小,相关指数 R^2 均比较大,接近于

1,拟合程度较高。说明 4 个试件均表现出了相似的蠕变规律,蠕变第 1 阶段和第 2 阶段的变形清晰可见,四元件 Burger 模型比较适合用于描述杨木单板条层积材的蠕变性能。

根据相关文献可知,参数 A 反映试件的瞬时弹性变形。曾有人研究过该参数的变化与试件厚度的关系^[14]。在该研究中,当试件的厚度为 20~21 mm 时,试件的瞬时弹性变形为 6~7 mm;而当试件厚度增加到 25 mm 时,其瞬时弹性变形便减小为约 5 mm,即在相同条件下,试件的厚度越大,瞬时弹性变形就越小。胶黏剂对参数 A 无太大的影响,该参数和试件的外加载荷、原始尺寸以及试验跨距有关。在试验跨距相同的条件下,4 个试件的瞬时弹性变形量不同,这是由于外加载荷不同而产生的。在试验的初期阶段对试件瞬时弹性变形测量的过程中,参数 A 存在一定的波动,这是因为在试验过程中,把同一张板上其他试件的平均静曲强度作为蠕变试件的静曲强度值,这 2 个值之间存在着微小的差异。

参数 B 反映试件的延迟弹性变形。该参数在整体趋势上随着胶黏剂体积分含量的增加而逐渐变小,也就是说延迟弹性变形逐渐变小。脲醛树脂胶是一种热固性胶黏剂,弹性模量比木材要高的多,导致它在应力作用下表现出来的粘性要比木材小的多。本试验中在热压工艺相同的条件下,对试验结果有影响的就是施胶的不均匀性,从而使参数 B 各不相同。

参数 C 是试件的粘弹性系数,其变化和试验过程所处的环境有关系。当试验环境的温度较高时,会使材料的内能增加,分子间的距离扩大,微布朗运动加剧,宏观上材料将变得更加柔软且富有韧性;而较高的相对湿度会使试件的含水率增加,水分在里面起到增塑剂的作用,使蠕变变形增加明显。

参数 D 是试件的粘性系数,在试验环境的温度和相对湿度较高的条件下,试件的粘性会有所增加。

从 4 个试件的蠕变变形趋势可以看出,不同的应力水平使试件产生的蠕变变形也不相同。在低应力水平下,蠕变的变形速度缓慢,而在高应力水平下,蠕变变形的速度明显高于低应力水平,且发生破坏的可能性大。而且随着应力水平的增加,瞬时弹性变形也有所增加。在相同的应力水平条件下,不同铺装方向的单板条层积材所表现的蠕变规律大致相同,但是平行铺装的单板条层积材比随机铺装的变形速率相对要快一些。

在整个试验过程中,由于昼夜温度和相对湿度的差异,使试件的吸湿和解吸反复交替进行,导致其蠕变变形会在小幅度范围内产生跳跃。但是材料在

外力的持续作用下,其变形的总趋势仍是增大的。

3 结论与讨论

木质材料在一定的载荷下发生的变形会随着时间的推移而不断增大,而且比其他工程材料如钢材、混凝土等具有更为明显的蠕变特性^[14]。木材及结构用材在工程上使用并长期承受应力时,其安全性和有效性主要应考虑在远未出现断裂之前的蠕变^[16]。

从以上拟合曲线图中可以看出,四元件 Burger 模型比较适合用于描述杨木单板条层积材的蠕变性能。

在不同的应力水平条件下,随着应力水平的增加,同一种铺装方向的杨木单板条层积材的瞬时弹性变形也相应增加。在相同的应力水平条件下,平行铺装的单板条层积材的蠕变变形比随机铺装的变形速率相对要快一些。

在整个试验过程中,由于杨木单板条层积材对试验环境的温度和相对湿度的波动比较敏感,因此存在机械吸附的作用。在昼夜温度和相对湿度有差异的条件下,试件的吸湿和解吸交替进行,导致其蠕变变形会在小幅度范围内产生跳跃。

杨木单板条层积材在蠕变试验进行到一定时间后,延迟弹性变形已趋于一个恒定值。大约在 600 h 后,可以近似的认为,只存在粘性变形。

由于时间条件的限制,本研究对杨木单板条层积材的研究只限于少量的试件。在后续研究中可以适当增加试件的数量以及采用各种不同方向铺装的单板条层积材来进行研究,这样能够更好地总结出杨木单板条层积材的蠕变规律。

本研究蠕变变形试验是在室温环境下进行的,在整个过程中没有使试件处于恒温恒湿的环境里。在今后的研究中,应该制造恒温恒湿的环境,使试件在整个变形过程中都处于同一环境条件下。

参考文献:

[1] 联合国粮食及农业组织. 2010 年森林资源评估主报告[R]. 罗马: 联合国粮食及农业组织,2011:12.

[2] 刘盛全,鲍甫成. 我国杨树人工林材性与加工利用研究现状及发展趋势[J]. 木材工业,1999,13(3):15-16.

LIU S Q,BAO F C. Current situation and development trends of research on wood properties , properties , processing & utilization processing & utilization of poplar plantation in China [J]. China Wood Industry, 1999,13(3): 15-16. (in Chinese)

[3] 殷鸣放,薛娟,宁良智,等. 基于近自然林业经营的不同密度林木竞争关系比较分析[J]. 西北林学院学报,2013,28(5):149-153.

YIN M F, YUE J, NING L Z, *et al.* Comparative study on

competition relationship of the foresee with different densities based on near-nature forestry management[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2013, 28(5): 149-153. (in Chinese)

[4] 国家林业局. 第七次全国森林清查结果[EB/OL]. <http://www.forestry.gov.cn>. 2010, 1.

[5] SMARDZEWSKI J, DZICIEGIELEWSKI ST. Stability of cabinet furniture backing boards[J]. Wood Science and Technology, 1993, 28(1): 35-44.

[6] SHEN Y H , RAKESH G. Evaluation of creep behavior of structural lumber in a natural environment[J]. Forest Products Journal, 1997, 47(1): 89-96.

[7] HANHIJARVI A, HUNT D. Experimental indication of interaction between viscoelastic and mechano-sorptive creep[J]. Wood Science and Technology, 1998, 32(1): 57-70. (in Chinese)

[8] 卢宝贤, 李静辉, 丁卫, 等. 几个主要树种的蠕变特性[J]. 力学与实践, 1996(1): 15-18.

[9] 李静辉, 刘广仁, 卢宝贤, 等. 受剪薄木板在变载下的挠度[J]. 东北林业大学学报, 1992, 20(5): 1-8.

LI J H, LIU G R, LU B X, *et al.* Deflection of sheared wood plate under the changing load[J]. Journal of Northeast Forestry University, 1992, 20(5): 1-8. (in Chinese)

[10] 那斌, 岳孔, 卢晓宁, 等. 速生杨木改性材蠕变性能的初步研究[J]. 中南林业科技大学学报, 2009, 29(3): 90-94.

NA B, YUE K, LU X N, *et al.* A primary study of the creep properties of modified fast -growing poplars[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2009, 29(3): 90-94. (in Chinese)

[11] 徐咏兰, 华毓坤. 不同结构杨木单板层积材的蠕变和抗弯性能[J]. 木材工业, 2002, 16(6): 10-12.

XU Y L, HUA Y K. Creep behavior and bending properties of poplar LVL in different assembly types[J]. China Wood Industry, 2002, 16(6): 10-12. (in Chinese)

[12] 贾娜, 金维洙. 单板层积材弯曲蠕变应力水平的相关性的试验研究[J]. 林业科技, 2008, 33(3): 38-40.

[13] 吕斌, 付跃进, 虞华强, 等. 结构胶合板蠕变测试方法的研究[J]. 木材工业, 2004, 18(4): 16-19.

LV B, FU Y J, YU H Q, *et al.* A new test method for creep of structural plywood[J]. China Wood Industry, 2004, 18(4): 16-19. (in Chinese)

[14] 杜以城. 杨木单板层积材蠕变性能的研究[D]. 南京: 南京林业大学, 2004.

[15] 岳孔. 速生杨木改性材力学性能及耐久性研究[D]. 南京: 南京林业大学, 2008.

[16] ROBERT J. Primary creep in douglas-fir beams of commercial size and quality [J]. Wood and Fiber Science, 1985, 17(3): 300-313.

(上接第 138 页)

[20] 韩崇选, 杨学军, 王明春, 等. 多效抗旱驱鼠剂的抗旱促长作用机理研究[J]. 西北林学院学报, 2003, 18(4): 96-99.

HAN C X, YANG X J, WANG M C, *et al.* A study on the mechanisms of drought resistance and growth promotion of RPA [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2003, 18(4): 96-99. (in Chinese)

[21] 韩崇选, 张浩, 党齐域, 等. 不同致死因素对植物抗逆剂油松蘸浆造林效果的影响[J]. 中国森林病虫, 2012, 31(5): 28-35

HAN C X, ZHANG H, DANG Q Y, *et al.* Influence of different lethal factors on afforestation by dipping seedlings of *Pinus tabulaeformis* in thick liquid of plant stress-resistance agents[J]. Forest Pest and Disease, 2012, 31(5): 28-35. (in Chinese)

[22] 姚显明, 白日, 常兴秋, 等. 油松飞播造林应用 HL 粉剂拌种防止鼠害的研究[J]. 林业科技通讯, 1991(7): 25-27.

[23] 李怀忠. 种子拌药提高柠条出苗率[J]. 植物保护, 1986, 12(6): 48.

[24] 姚显明, 李久林, 白日. 油松种子涂色模拟飞播造林学鸟、鼠试验初报[J]. 辽宁林业科技, 1986(6): 51-53.

[25] 张振核, 郑维鹏, 伊可儿, 等. 鸟鼠忌食新药剂试验研究初报[J]. 福建林业科技, 1992(3): 38.

[26] 宋廷国. 飞播治沙中应用多效复合剂拌种成效调查[J]. 辽宁林业科技, 2000(4): 34-35.

[27] 张希金, 张亚光. 多效复合剂应用效果调查[J]. 辽宁林业科技, 2001(3): 19-20.

[28] 毛秀齐, 张永杰, 张永生, 等. 油松林用保水剂包衣种子飞播造林试验报告[J]. 河南林业科技, 2000, 20(4): 13-14.

[29] 杨静莉, 张春美, 李继光, 等. 兔害防治措施及评价[J]. 中国森林病虫, 2004, 23(3): 30-32.

YANG J L, ZHANG C M, LI J G, *et al.* Control measures against rabbit pest and its evaluation[J]. Forest Pest and Disease, 2004, 23(3): 30-32. (in Chinese)

[30] NINAN K N, JYOTHIS S. The economics of biodiversity conservation: a study of a coffee growing region in the Western Ghats of India[J]. Ecological Econ., 2005, 55(1): 61-72.