

基于声发射技术的木材害虫信号特征检测

豆春峰,熊鑫,李明,朱代根*

(西南林业大学 机械与交通学院,云南 昆明 650224)

摘要:针对木材害虫声发射(AE)信号检测问题,研究杨树木段中麻点豹天牛幼虫 AE 信号波形特征及其信号的能量,为钻蛀害虫声音的监测提出一种新的方法。取一段具有麻点豹天牛幼虫的杨树木段,通过采样频率为 500 kHz 的 2 通道木材蠕变声发射信号采集系统采集原始 AE 信号。对采集到的原始信号滤波后进行小波分解,通过对各层高频信号的分析获取 AE 信号的频域特征,并对其进行重构与信号解析。结果表明,麻点豹天牛幼虫 AE 信号的主频主要集中在 30 kHz 附近,其信号的能量在 16:00 最高,反映了该幼虫在 15:00—16:00 较活跃。

关键词:木材害虫;声发射;滤波;小波分解

中图分类号:S763.7 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-7461(2020)04-0120-05

Signal Characteristics Detection of Wood Pests Based on Acoustic Emission Technology

DOU Chun-feng, XIONG Xin, LI Ming, ZHU Dai-gen*

(College of Machinery and Transportation, Southwest Forestry University, Kunming 650224, Yunnan, China)

Abstract: Aiming to solve the problem of acoustic emission (AE) signal detection of wood pests, the characteristics of AE signal waveform and its energy of *Coscinesthes salicis* larvae in *Populus* segments were studied, and a new method for monitoring the sound of borer insects was proposed. A section of *Populus* trees with larvae of *C. salicis* was collected. The original AE signal was collected by a two-channel acoustic emission signal acquisition system with a sampling frequency of 500 kHz. The original signal was filtered and decomposed by wavelet transform. The frequency domain characteristics of AE signal were obtained by analyzing the high frequency signals of each layer, and then reconstructed and analyzed. The results showed that the main frequency of AE signal of *C. salicis* larvae was mainly around 30 kHz. The highest signal energy was found at 16:00, indicating that the larva was active between 15:00 and 16:00.

Key words: wood pest; acoustic emission; filtering; wavelet decomposition

声发射检测作为一种主动的无损检测方法,为木材害虫检测提供了新的途径。很早之前国外学者最先考虑使用声音检测技术进行害虫监测。C. K. Brain^[1]第 1 次对水果害虫的取食声进行研究,证明了声音检测技术的可行性。R. E. Adams^[2]又检测到了储粮害虫的活动声音,后来便开始了利用声音检测技术对储粮害虫进行研究。R. W. Mankin^[3]使用便携式低频声波系统探测城市树木中的白蚁,证明了可以利用声学系统检测和监测城市树木和建筑

物周围白蚁感染的情况。R. W. Mankin^[4]通过在受感染的茎基部安装一个加速计进行声学检测来研究黄蜂幼虫在小麦茎内的取食行为。D. Chesmore^[5]利用声学方法来检测害虫的运动和摄食活动,并说明了如果害虫具有独特的摄食特性,也可以用来识别物种。Sandie Le Conte^[6]将声发射技术用于检测欧洲博物馆保存的木质文化遗产乐器中的木虱昆虫,证明了利用宽带高频传感器(75~1 000 kHz)和高水平的放大来补偿木材中的声衰减,可以检测到

收稿日期:2019-09-24 修回日期:2019-10-28

基金项目:国家自然科学基金(31760182)。

作者简介:豆春峰。研究方向:机械制造及其自动化。E-mail:1475338710@qq.com

* 通信作者:朱代根,副教授,硕士生导师。研究方向:农业与林业机械化。E-mail:84080561@qq.com

木质材料中存在非常小的幼虫。

近年来国内学者也逐渐应用声音检测技术对木材钻蛀害虫进行研究,钻蛀害虫因其生活场所隐蔽,所以很难准确对其取食行为和活动规律等进行研究,而使用声音检测技术通过声音信号的收集进行研究是相对较客观的研究技术。程惊秋^[7]研究了寄主木段中的桔褐天牛幼虫、桑粒肩天牛幼虫的声行为,天牛幼虫在寄主内因取食、爬行活动而产生沿寄主传导的固体声。赵元吉等^[8]使用昆虫声音探测仪 AED-2000 在对受害木内的双条杉天牛幼虫的活动进行监测,证明了幼虫分布位置和被测木段长度对探测效果有显著影响。韦雪青等^[9]总结了害虫声音检测的研究发展历史,分析了不同昆虫类群的声音探测技术的优势。王鸿斌等^[10]应用开发设计的昆虫声音采集与录制系统对红脂大小蠹两性成虫声音信号进行了采集,利用 Adobe Audition 与 matlab 软件对雌雄成虫之间的声行为信号进行了脉冲组、频率、持续时间、频谱等特征分析。许小芳等^[11]在消音装置中对木材钻蛀性害虫活动声进行采集,经噪声消除,提取有效信号,进行功率谱分析。潘杰等^[12]利用声音探测技术分析了缝锤小蠹与美西部云杉小蠹成虫的取食与爬行声信号特征,发现相同种小蠹的取食和爬行声信号明显不同,不同种小蠹的取食和爬行声信号也明显不同,声信号脉冲持续时间、主频差异显著。

目前应用声发射技术对木材害虫信号特征的研究还并不多见,本研究以杨树木段中的麻点豹天牛幼虫为研究对象,该幼虫的活动产生 AE 源,通过采样频率为 500 kHz 的 2 通道木材蠕变声发射信号采集系统采集原始 AE 信号,对采集到的原始信号滤波并进行小波分解,通过对各层高频信号的分析获取 AE 信号的频域特征并对其进行重构,对重构后的信号波形进行分析,并进一步研究信号的能量。

1 材料与 方法

麻点豹天牛是杨树等速生丰产林木的危险性害虫,取一段带有麻点豹天牛幼虫的杨树木段为试验材料。试验所用带有麻点豹天牛幼虫杨树木段取自云南省昆明市区东北郊处的鸣凤山林区,杨树木段的尺寸为长 600 mm,直径 45 mm。基于 NI 高速采集卡和 Lab VIEW 建立 2 通道木材蠕变声发射信号采集系统,传感器型号为 SR 150 N,带宽 22~220 kHz,同时配备了增益为 40 dB 前置放大器,采样频率设置为 500 kHz,信号的电压幅值设置为(−5~5 V)^[13]。本试验的硬件组成如图 1 所示。

本研究试验使用木材蠕变声发射信号采集系统

采集杨树木段中害虫的活动信号,此系统设置有记录时长和间隔时间,由于无法准确预测害虫活动的时间,需要对采集系统进行采集时间设置,通过观察本试验木段中害虫大概活动的持续时间和间隔时间,最终采用设置记录时长为 30 s、间隔时间为 1 h,对木段中的害虫信号进行采集,采集时间为 8:00—17:00。为了试验的可靠性,用同一虫源在相同环境下连续 3 d 采集从 8:00—17:00 的幼虫信号,由此采集 30 组信号,相同时间点采集 3 组信号。

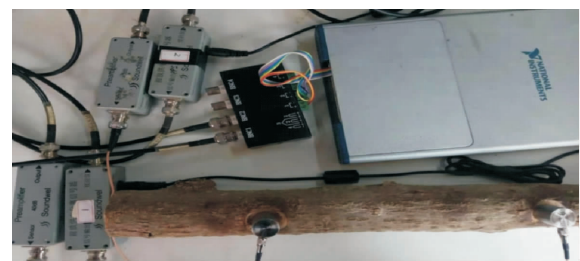


图 1 AE 信号采集系统硬件组成
Fig. 1 Hardware composition of AE signal acquisition system

对所采集的原始 AE 信号进行截取,截取 20 ms 用于分析信号的时域和频域特征。由于害虫活动产生的信号很弱,容易受周围环境噪声信号影响,所以本试验先对截取的 20 ms 原始 AE 信号进行滤波降噪处理,再采用小波分析的方法从原始信号中重构有效的 AE 信号波形。小波分析的过程就是逐层将信号进行多尺度细化,最终细化为低频信号和 高频信号,其中高频信号是细节信号^[14]。在本试验中,相对于噪声信号而言,害虫活动信号较弱,通过对小波分解的高频信号部分进行分析可以得到有效的 AE 信号。小波分析是时间频率的局部化分析,由于 db10 小波具有较强的频域局部化能力,因此采用 db10 作为小波基函数^[15]。根据香农采样定理,本试验选择 5 层小波分解对 AE 信号进行分析研究。

2 结果与 分析

传感器采集的原始信号的波形与频谱如图 2 所示,虽然传感器的频率范围是 22~220 kHz,也能采集到<22 kHz 的信号。为了更好地分析信号的波形,所以先对原始信号进行滤波,滤波后的信号波形与频谱如图 3 所示。

由于原始信号中含有大量的噪声信号,从原始信号的频谱图中不能准确分析出 AE 源信号特征,必须把采集的原始信号中的噪声信号去除掉^[16]。为此,本研究采用小波分析的方法从原始信号中重构有效的 AE 信号波形,此信号的 5 层小波分解的时域信号如图 4 所示,相应的频域信号如图 5 所示。

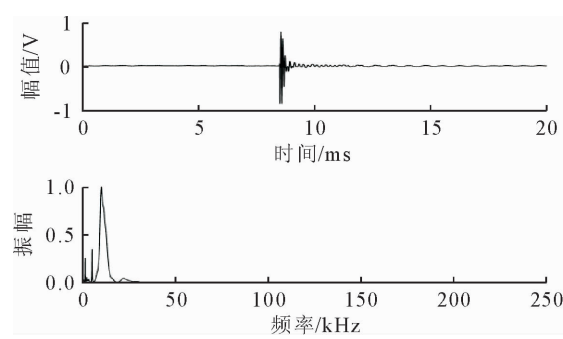


图 2 原始信号的波形与频谱

Fig. 2 Waveform and spectrum of the original signal

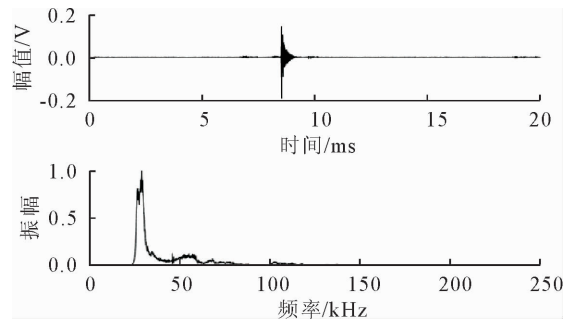


图 3 原始信号滤波后的波形与频谱

Fig. 3 Waveform and spectrum of filtered original signal

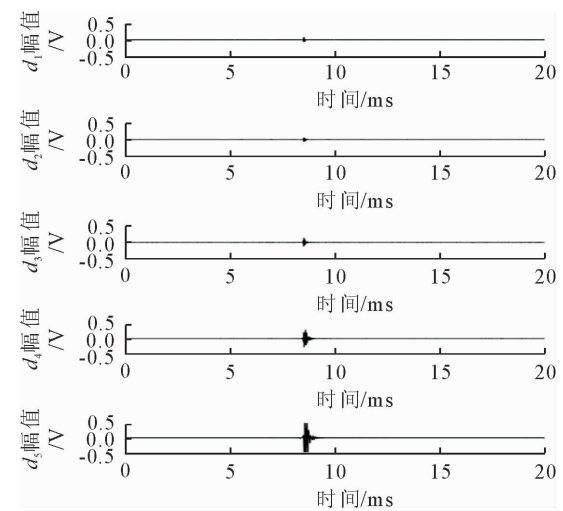


图 4 各层小波分解细节信号波形

Fig. 4 Detail signal waveforms decomposition by wavelet at each level

图 5 的第 1 层分解信号的频率主要集中在 165 kHz 附近,结合图 4 中的第 1 层信号波形,可看出其信号幅值低并且信号持续时间短,因此可以认为该层信号为高频噪声信号。图 5 中第 2 层分解信号的频率比较分散,主频在 104 kHz 附近,对比图 4 中第 2 层信号波形,此信号幅值较小,也可以认为该层信号为高频噪声信号。图 5 中第 5 层分解信号的频率为 12 kHz,小于 AE 传感器的下限频率 22 kHz,因此可认为该层分解信号为低频噪声信号^[14]。所以,采用小波分解后的第 3 层和第 4 层的细节信号重构

AE 信号波形,重构后的 AE 信号波形与频谱如图 6 所示。从图 6 中的重构波形与频谱图中可以看出 AE 信号主频率集中在 30 kHz 附近。

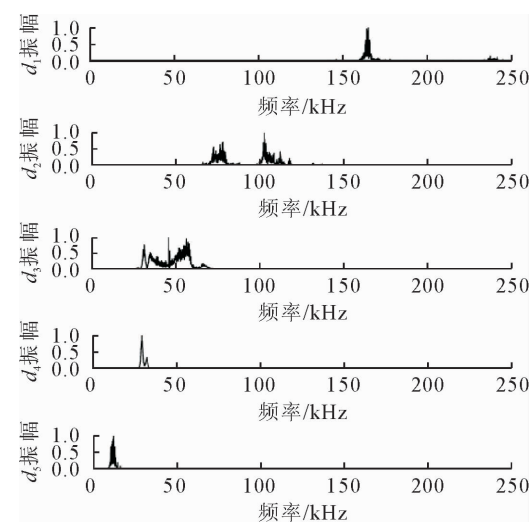


图 5 各层小波分解细节信号的频谱图

Fig. 5 Spectra of detail signal decomposed by wavelet in each layer

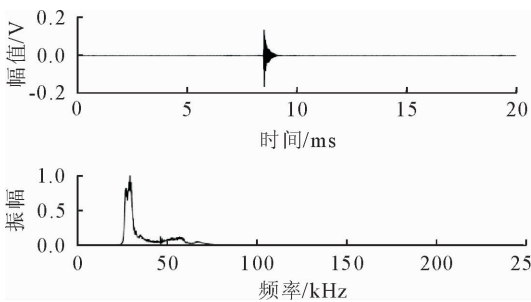


图 6 AE 信号重构波形与频谱

Fig. 6 Waveform and spectrum reconstruction of AE signal

对所采集的 30 组信号进行小波分解并重构,最终研究 AE 信号的频率范围,并把相同时间点的频率值取平均,得到 10 组信号的频率范围(表 1)。从表 1 可以看出,AE 信号频率基本稳定,主要集中在 30 kHz 附近,2、4、8 组信号频率相近,主频集中在 46 kHz 附近,但是和其他组相差较大。AE 信号频率不同说明害虫的活动行为不同,根据 AE 信号的波形和频率可以判断害虫的活动行为(取食或爬行),这为之后研究木材害虫的活动信号特征提供了方向。

表 1 AE 信号频率范围

Table 1 Frequency range of AE signals

组号	频率/kHz	组号	频率/kHz
1	30.17	6	29.48
2	46.43	7	29.72
3	30.25	8	46.15
4	46.10	9	30.00
5	30.41	10	30.15

信号能量反映害虫的活跃程度,将不同时间点的信号能量表示出来,可以看出害虫不同时间点的活跃程度,由此可以进行害虫的检测与防治。信号能量可以用平均能量来表示,就是各点信号幅值平方后求和再取平均。对图 6AE 信号重构波形图中在 5~10 ms 时间内取 5 000 个点,然后计算其平均能量,即

$$E_{xi}=\frac{1}{5\ 000}\sum_{i=1}^{5\ 000}x_i^2\tag{1}$$

式中, E_{xi} 表示各组信号的能量; x_i 表示各点的幅值。

这个信号的能量可以表示为一天中某个时间点的害虫信号能量。将从 8:00—17:00 采集的 30 组波形信号进行处理并计算出每组信号的能量,并计算出每个相同时间点的 3 组信号的能量平均值,最后得到从 8:00—17:00 的 10 组信号的能量,每一组信号能量为 3 d 内相同时间点信号能量的平均值,然后绘制出能量时间变化图(图 7)。本研究所得数据呈现波动状,计算这 10 组数据的平均值为 0.042 5 V,方差为 0.013 7 V,方差小于平均值,通过方差分析造成波动的原因是害虫在一天中活动行为的变化,不同时间段的信号能量不同,反映出了害虫的活跃程度不同。由图 7 可以看出,8:00—11:00 信号能量较低且变化平缓,说明这个时间段害虫在小范围爬动,活跃程度比较微弱;11:00—12:00 信号能量有明显增大,害虫的活跃程度相对明显;12:00—15:00 信号能量又有明显下降,说明害虫可能在休息,15:00—16:00 信号能量突然猛增,达到最高,因为害虫幼虫在这个时间段的活动较为频繁,说明害虫在对杨树木段进行蛀食,取食后信号的能量又突然下降。由此可知,对不同活跃程度时间段的害虫信号进行检测,特别是在信号能量较高即害虫的活跃程度明显的时间段检测,可以有效地监测研究害虫的活动,并进行防治。

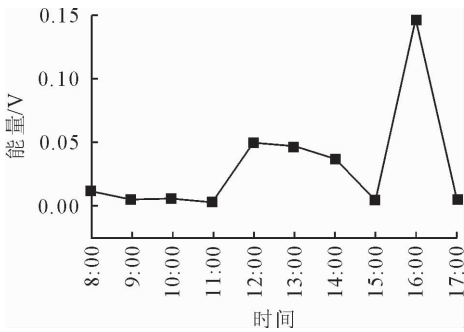


图 7 AE 信号能量变化

Fig. 7 Energy variation diagram of AE signal

3 结论与讨论

对带有麻点豹天牛幼虫的杨树木段进行 AE 信

号检测,通过对采集的 AE 信号进行截取和处理得到 AE 信号的原始波形图和频谱图,将原始 AE 信号进行滤波后并对其 5 层小波分解,再把第 3 层和第 4 层的分解信号重构,得到重构后的 AE 波形和频谱,总结得出此害虫幼虫信号的频率主要集中在 30 kHz 左右。害虫的信号能量可以反映出害虫的活跃程度,该害虫幼虫在 15:00—16:00 最为活跃,害虫信号的频率和能量可以判断出害虫的活动行为,这为之后研究木材害虫的行为信号特征打下了基础。

木材中害虫幼虫活动产生的信号很弱,容易受周围环境噪声信号影响,因此试验采集到的原始 AE 信号中会混有大量的噪声。为了获得真实的 AE 信号特征,对原始 AE 信号进行滤波降噪处理,再采用小波分析的方法从原始信号中重构有效的 AE 信号波形。在小波分析过程中,选取合适的小波基函数较困难,因为同一 AE 信号选取不同的小波基函数进行处理会有不同的分析结果,这是小波分析存在的局限性。

本研究仅对杨树木段中麻点豹天牛幼虫的声发射信号波形和能量进行了研究,为其他种类的木材害虫 AE 信号特征的研究提供了参考。未来可对害虫的位置进行定位研究,并确定害虫的种类和数量以及害虫活跃的具体时间,对木材害虫进行监测和防治。

参考文献:

[1] BRAIN C K. Preliminary note on the adaptation of certain radio principles to insect investigation work[J]. Ann. Univ. Stellenbosch Ser. ,1924(2):45-47.

[2] ADAMS R E,WOLFE J E,MILNER M,et al. Aural detection of grain infested internally with insects[J]. Science,1953,118:163-164.

[3] MANKIN R W,OSBRINK W L,OI F M,et al. Acoustic detection of termite infestations in urban trees[J]. Journal of Economic Entomology,2002,95(5):981-988.

[4] MANKIN R W,WEAVER D K,GRIESHOP M J,et al. A-acoustic system for insect detection in plant stems;comparisons of Cephus cinctus in wheat and Metamasius callizona in bromeliads[J]. Journal of Agricultural and Urban Entomology,2004,21(4):239-244.

[5] CHESMORE D,SCHOFIELD J. Acoustic detection of regulated pests in hardwood material[J]. Eppo Bulletin,2010,40(1):46-51.

[6] SANDIE LE CONTE,et al. Acoustic emission to detect xylophagous insects in wooden musical instrument[J]. Journal of Cultural Heritage,2015,16(3):338-343.

[7] 程惊秋. 桔褐天牛和桑粒肩天牛幼虫声行为的研究[J]. 林业科学,1993,29(4):307-312.

[8] 赵源吉,韦雪青,温俊宝,等. 双条杉天牛幼虫声音探测技术初报[J]. 生态科学, 2009,28(3):242-246.
ZHAO Y J, WEI X Q, WEN J B, *et al.* Preliminary study on the acoustic detection of larvae *Semanotus bifasciatus* (Motschulsky)[J]. Ecological Science, 2009,28(3):242-246. (in Chinese)

[9] 韦雪青,温俊宝,赵源吉,等. 害虫声音监测技术研究进展[J]. 林业科学, 2010,46(5):147-154.
WEI X Q, WEN J B, ZHAO Y J, *et al.* Review on monitoring technology of the insect acoustic[J]. Forestry Science, 2010,46(5):147-154. (in Chinese)

[10] 王鸿斌,赵丽稳,罗茜,等. 红脂大小蠹声音信号记录、分析与发声器官电镜观察[J]. 林业科学研究, 2012,25(1):17-22.
WANG H B, ZHAO L W, LUO Q, *et al.* Acoustic signals of *Dendroctonus valens* and structure of its stridulatory apparatus[J]. Forestry Science Research, 2012, 25(1): 17-22. (in Chinese)

[11] 许小芳,周红生,娄定风,等. 木材钻蛀性害虫活动声信号的采集与分析[C]. 西安:上海市声学学会声学学术会议, 2011.

[12] 潘杰,刘翔,邵沛泽,等. 缝锤小蠹与美西部云杉小蠹的声学特征与比较[J]. 环境昆虫学报, 2014,36(3):395-401.
PA J, LIU X, SHAO P Z, *et al.* Acoustic characteristics and their comparison of *Gnathotrichus materiarius* and *Gnathotrichus sulcatus* [J]. Journal of Environmental Entomology, 2014,36(3):395-401. (in Chinese)

[13] 鞠双,李新慈,罗廷芳,等. 马尾松胶合木表面声发射信号各向异性传播规律[J]. 林业工程学报, 2019,4(2):48-53.
JU S, LI X C, LUO T F, *et al.* Anisotropic propagation of acoustic emission signal on surface of *Pinus massoniana* Lamb. glulam[J]. Journal of Forestry Engineering, 2019, 4(2): 48-53. (in Chinese)

[14] 鞠双,李新慈,罗廷芳,等. 应用小波分析法对马尾松胶合木表面声发射信号特征检测[J]. 东北林业大学学报, 2018,46(8):86-92.
JU S, LI X C, LUO T F, *et al.* Detection of acoustic emission signal characteristics on masson pine plywood surface by wavelet analysis[J]. Journal of Northeast Forestry University, 2018,46(8):86-92. (in Chinese)

[15] 李新慈,鞠双,罗廷芳,等. 马尾松胶合木胶层对声发射信号传播特性的影响[J]. 西北林学院学报, 2019,34(3):185-190.
LI X C, JU S, LUO T F, *et al.* Effect of masson pine plywood layer on acoustic emission signal propagation characteristics [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2019, 34(3): 185-190. (in Chinese)

[16] 于帅帅,申丽娟,李杨,等. 云南松表面声发射信号采集与特征分析[J]. 西北林学院学报, 2017,32(2):247-251.
YU S S, SHEN L J, LI Y, *et al.* Acquisition and characteristic auaglysis of the sarface of *Pinus yunnanensis* acoustic emission signal [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2017,32(2):247-251. (in Chinese)

(上接第 31 页)

[12] 马明呈,张育浩,元王涛,等. 青海五裂茶藨子叶绿体 DNA psbA-trnH 序列的遗传变异研究[J]. 西北林学院学报, 2015,30(4):116-120.
MA M C, ZHANG Y H, YUAN W T, *et al.* Genetic differentiation study of chloroplast DNA psbA-trnH in *Ribes meyeri* from Qinghai[J]. Journal of Northwest University, 2018, 30(4):116-120. (in Chinese)

[13] 傅立国. 中国植物红皮书[M]. 北京:科学出版社, 1991:480.

[14] 陈伟,史富强,杨文忠,等. 云南蓝果树的种群状况及生态习性[J]. 东北林业大学学报, 2011,39(9):17-19.
CHEN W, SHI F Q, YANG W Z, *et al.* Population status and ecological characteristics of *Nyssa yunnanensis* [J]. Journal of Northeast Forestry University, 2011, 39(9): 17-19. (in Chinese)

[15] 吴娅萍,侯昭强,陈中华,等. 云南蓝果树的种群资源及分布现状[J]. 西部林业科学, 2015,44(6):26-30.

[16] 晁岳恩,常阳,王美芳,等. 7 种作物叶绿体基因的密码子偏好性及聚类分析[J]. 华北农学报, 2012,27(4):60-64.

[17] WRIGHT F. The ‘effective number of codons’ used in a gene [J]. Gene, 1990,87(1):23-29.

[18] SUEOKA N. Near homogeneity of PR2-bias fingerprints in the human genome and their implications in phylogenetic analyses[J]. Journal of Molecular Evolution, 2001,53(4/5):469-476.

[19] 秦政,郑永杰,桂丽静,等. 樟树叶叶绿体基因组密码子偏好性分析[J]. 广西植物, 2018,38(10):1346-1355.

[20] DANIELL H, KHAN M S, ALLISON L. Milestones in chloroplast genetic engineering: an environmentally friendly era in biotechnology[J]. Trends in Plant Science, 2002,7(2):84-91.

[21] DURET L. tRNA gene number and codon usage in the *C. elegans* genome are co-adapted for optimal translation of highly expressed genes[J]. Trends in Genetics, 2000, 16(7): 287-289.

[22] MORTON B R. The role of context-dependent mutations in generating compositional and codon usage bias in grass chloroplast DNA [J]. Journal of Molecular Evolution, 2003, 56(5):616-629.

[23] GU W, ZHOU T, MA J, *et al.* Analysis of synonymous codon usage in SARS *Coronavirus* and other viruses in the *Nidovirales* [J]. Virus Research, 2004,101(2):155-161.

[24] 续晨,贲爱玲,蔡晓宁. 蝴蝶兰叶绿体基因组密码子使用的相关分析[J]. 分子植物育种, 2010,8(5):945-950.
XU C, BEN A L, CAI X N. Analysis of synonymous codon usage in chloroplast genome of *Phalaenopsis aphrodite* subsp. *formosana* [J]. Molecular Plant Breeding, 2010, 8(5): 945-950. (in Chinese)

[25] 张月荣. 禾本科叶绿体基因组密码子使用模式及紫茎泽兰叶绿体 RNA 编辑分析[D]. 杨陵:西北农林科技大学, 2013.

[26] LIU S, XUE D, CHENG R, *et al.* The complete mitogenome of *Apocheima cinerarius* (Lepidoptera: Geometridae: Ennominae) and comparison with that of other lepidopteran insects [J]. Gene, 2014,547(1):136-144.

[27] 尚明照,刘方,华金平,等. 陆地棉叶绿体基因组密码子使用偏性的分析[J]. 中国农业科学, 2011,44(2):245-253.