

迷卡斗蟋鸣声的声学特征及其生物学意义

陈道海^{1,2}, 袁肇友¹, 杜金球¹, 陈华絮¹

(1. 湛江师范学院生物系, 广东湛江 524048; 2. 中国海洋大学生命科学与技术学部, 山东青岛 266003)

摘要: 首次利用计算机技术对迷卡斗蟋 *Velarifictorus micado* (Saussure) 的鸣声特征及其生物学意义进行了研究。结果表明: 迷卡斗蟋在不同性比条件下, 鸣声的声学特征不同。雄性独处时发出召唤声; 2 只以上的雄性在一起时会发出警戒声、挑战声或胜利声; 1 雄 1 雌在一起时会发出欢迎声、求爱声, 如果雌性不理睬雄性的求爱时则会发出一种催促声。利用计算机, 除了对人们用耳辨别的 3 种鸣声(召唤声、求偶声和争斗声)进行客观记录外, 还可以对以前所称的“求偶声”和“争斗声”进行更细致地分析和比较。根据其生物学意义, 作者首次将其鸣声分为 7 种, 并对这 7 种鸣声在功率谱和时域两方面进行了比较, 发现迷卡斗蟋在不同行为下有不同的鸣声特征, 传递不同的信息。

关键词: 迷卡斗蟋; 鸣声; 声学特征; 行为

中图分类号: Q965 文献标识码: A 文章编号: 0454-6296(2005)01-0082-08

Acoustic properties in sounds of the eastern striped cricket, *Velarifictorus micado* (Saussure) and their biological implications

CHEN Dao-Hai^{1,2}, YUAN Zhao-Qing¹, DU Jin-Qiu¹, CHEN Hua-Xu¹ (1. Department of Biology, Zhanjiang Normal College, Zhanjiang, Guangdong 524048, China; 2. Division of Life Science and Technology, Ocean University of China, Qingdao, Shandong 266003, China)

Abstract: The structure, spectra and temporal parameters of sounds of *Velarifictorus micado* under different conditions were studied by acoustic analysis techniques. The results show that the sounds can be classified into 7 types of songs: calling, warning, provoking, victory, welcome, courting and urging song. The experiments show that the characteristics of these 7 types of songs are distinguished in acoustic properties with specific behavior and biological information.

Key words: *Velarifictorus micado*; sounds; acoustic property; behavior

昆虫声学是生物声学的一个重要组成部分, 20 世纪中叶以来, 随着科学技术的发展以及应用的需要, 使它得到了迅速的发展。近年来, 鸣虫类的鸣声特征已广泛应用于种类鉴别、地理分布和区系的研究, 尤其是在近缘种的分类上显示了其突出的优越性和可靠性(何忠和陈念丽, 1985; 吴福桢等, 1986; 彩万志, 1988; 何忠等, 1989; 雷仲仁等, 1994; 李恺和廉振民, 1999b; 杨培林等, 2000); 在昆虫声通讯、声诱导等方面也有研究报道(何忠等, 1989; 常岩林, 2000); 在昆虫分类学研究中, 鸣声则被用来作为鉴别各种鸣虫的有效性状(彩万志, 1988; 雷仲仁等, 1994; 李恺和郑哲民, 1999a)。动物行为学作为揭示生命活动规律、探索生命体与环境之间关系的重要领域之一已成为国际、国内的研究热点。因此, 国外

有关昆虫鸣声结构、功能、机制及与行为之间关系的研究也日渐增多, 如昆虫交配行为与鸣声的关系(Chang and Miller, 1977; Bennet-Clark *et al.*, 1980; Crossley and Mcdonajd, 1980; Crossley, 1986; 陈道海等, 2002), 鸣声与遗传物质之间的关系(Hoy, 1974; Kyriacou and Hall, 1986; Greenacre *et al.*, 1993), 鸣声的功能(von Schilcher, 1976; Kyriacou and Hall, 1982; Simmons, 1988, 2004; Shaw, 2000; Shaw and Herlihy, 2000), 发音器的形态结构(石福明和郑哲民, 1999; 石福明等, 2001; 谢令德和郑哲民, 2001)及发声和接收机制(Römer and Krusch, 2000; Pollack, 2000)等。傅强等(1999)利用前人的成果, 将雄性褐飞虱的第 2 种鸣声回放给雌性, 可以起到抑制生殖的作用。以前对昆虫鸣声的研究主要在时域特征上, 但对鸣

基金项目: 湛江市科学技术委员会重点科研项目资助(200201); 湛江师范学院重点科研项目资助(L111)

作者简介: 陈道海, 男, 39 岁, 博士研究生, 副教授, 研究方向为动物行为学和保护生物学, E-mail: dhchen11@21cn.com

收稿日期 Received: 2003-12-26; 接受日期 Accepted: 2004-08-04

声的时域、功率谱与其行为之间关系的研究还不多见。我们首次对迷卡斗蟋 *Velarifictorus micado* (Saussure) (直翅目,蟋蟀总科)在不同行为模式下的鸣声结构及其含义进行了较系统的分析,为鸣声声学特征及所代表的生物学意义(或信息)分析提供了一种方法,为鸣声在分类学、行为学等方面的应用提供了重要的科学依据。

1 材料和方法

1.1 材料

迷卡斗蟋采自湛江师范学院校园和寸金公园内。雄虫单独放在玻璃瓶内,瓶底放少许沙子,置于靠窗户桌子上,使其享受自然光,以胡萝卜、苹果、青菜等喂养。雌性则集中放在一起。

1.2 方法

受试迷卡斗蟋按性比设 3 组处理:单只雄虫独处时的鸣叫;两雄时的鸣叫;1 雄 1 雌、1 雄多雌时的鸣叫。重复 3 次。当时室温 28 ~ 30℃。

用声音软件 Cool edit 2000 外接话筒将同一只雄虫在不同性比情况下发出的鸣叫声录入计算机,话筒与目标物相距 5 ~ 10 cm,采用 44.1 kHz(采样率)/16 bit 条件下进行大量录音。对同一鸣声不同时段进行 3 次重复采样,采用快速傅里叶变换(FFT size 为 8192)对鸣声信号进行功率谱和时域分析,并统计数据,各参数分别为:幅度(range)为 120 dB, Reference:0 dBFS,选 Blackman-Harris、Linear View,窗口宽度(window width) = 50 ms, RMS Settings:0 dB = FS Square Wave。然后用 Photoshop 6.0 处理并打印结果。

发音器结构观察:将雄性右翅取下,用 E-1010 电子溅射仪镀膜后,在 Philips SL30 扫描电镜下观察音锉和刮器。

1.3 鸣声类型判断

各组蟋蟀的行为用摄像头监控。召唤声是雄虫独处并不受干扰的情况下发出的鸣声;雄虫在其领地受到其他雄虫入侵或与其争夺配偶时,常以警戒声恐吓对方,如果侵入者还不离开,则会发出挑战声;求偶声是在有雌虫存在时,雄虫求偶所发出的声音。

两雄性相遇时,领地“主人”突然停止鸣叫,静立原地。接着震动身体,做出打斗的姿势并发出明显的格斗声。打斗的方式是用大额互相撕咬。随着打斗过程的进行,将其鸣叫分为 3 种:警戒声、挑战声

和胜利声。

当有另外的雄性入侵领地时,领地“主人”会调整身体方位,面对外来雄性,震动身体并展开前翅发出警戒声。

“主人”在警戒无效的情况下(即介入的雄蟋蟀不愿意离开),便会靠近对方并发出挑战声。在发生打斗(即双方用大额互相撕咬)时,双方也会发出这种鸣叫。

打斗结束后,败者逃走。胜者则在原地鸣叫不息,这种鸣声称为胜利声。

当有雌虫存在时,雄性会发出求偶声。常伴之清理触角或急速摆动触角。其鸣声一般可分 2 种:欢迎声和求爱声。当雌性不理睬雄性的求爱时,雄性也会发出一种催促的鸣声。

雄性用召唤声引来雌性后,雄性用其触角碰雌性触角,或用触须轻轻拍打雌性,或用尾部接近雌性并试图接触雌性身体,同时发出欢迎声。求爱过程中,雌、雄性尾部相互靠近;同时雄性发出低沉的求爱鸣声。当雌性从雄性的身边经过时,雄性将尾部插入雌性腹面“抚摸”对方,试图交配。持续几分钟甚至半小时的求爱鸣叫后,雌性爬到雄性个体的背面进行交配。当雌性不理睬雄性的求爱时,雄性绕着雌性不停运动,两只触角同时急速前后摆动并身体抖动,偶尔发出催促鸣声。

2 结果与讨论

2.1 迷卡斗蟋发声机理与鸣声结构

蟋蟀利用前翅与前翅相摩擦而发声。右前翅在上,左前翅在下。位于右前翅腹面前部的齿脉,称为“音锉(file)”,排成一列,由约 170 个间距比较均匀的角质化音齿组成。音齿砧状,左、右边宽度一致,顶缘线平直,中部较厚,两边较薄,宽约 58.6 μm ,间距约 7.2 μm ,后面呈刀削状(图 1)。左翅内侧上缘具有“刮器(plectrum)”,其结构简单。它与音锉上的音齿相摩擦,刮器每撞击一个音齿产生声脉冲的一个波。

斗蟀鸣叫时,双翅每合拢一次,便产生 1 次鸣叫,称为音节,由不同数目音节的重复构成音组。一系列音组与音组间隔组成 1 次鸣叫全过程。载波、脉冲、音节和音组等时域特征及功率谱特征共同构成其声学特征。

2.2 鸣声的声学特征

迷卡斗蟋鸣声的声学特征主要与性比有关。其

鸣声主要有以下几种:召唤声、争斗声(包括警戒声、挑战声和胜利声)、求偶声(欢迎声、求爱声和催促声)。声学参数见表 1。

2.2.1 召唤声(calling song): 是雄虫独处并不受干扰的情况下发出的鸣声,声音尖锐而响亮,久远可闻,人们平常听到的就是这种鸣声。召唤声以“ji”为 1 个音节。召唤声功率谱见图 2(A):频带较宽,

并伴有 3 个陪音;主频率为 $4\,568 \pm 20.8$ Hz,次能峰频率为 $8\,402 \pm 44$ Hz(表 1)。召唤声的节律见图 2(B):音组持续时间较长,音组间隔时间也较长;每一音组由 4 个音节组成,每一音节由 3~4 个脉冲组成,第 1 音节由 4 个脉冲组成,另 3 个音节各由 3 个脉冲组成;脉冲的大小相似,平均间隔时间为 11 ± 0.82 ms(表 1)。

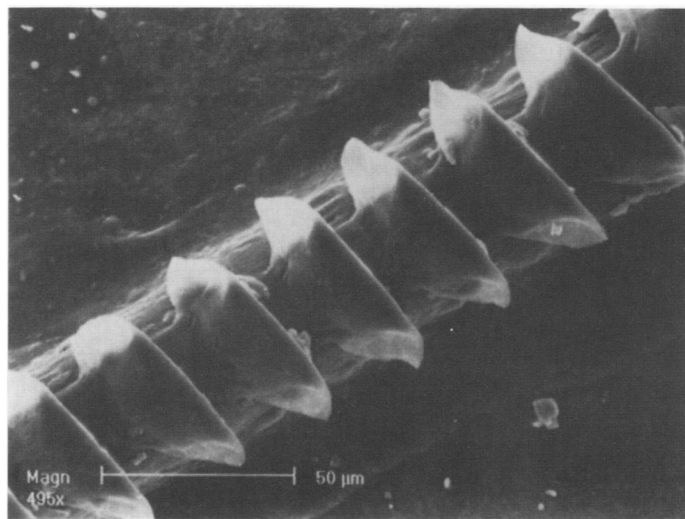


图 1 迷卡斗蟋发音器——音锉

Fig. 1 File, vocal organ of *Velarifictorus micado* (495 ×)

2.2.2 争斗声(wrestling song): 这是 2 个以上雄虫或为了争夺领地,如争夺洞穴;或为了争夺雌性配偶时所发出的鸣声。为了表达不同的信息,其鸣叫声可分为 3 种:

(1)警戒声(warning song):雄虫在其领地受到其他雄虫的入侵或与其争夺配偶时,常以警戒声恐吓对方。其鸣声节奏不甚有序,高低不一。警戒声功率谱见图 3(A1):其频带较宽,主频率为 $4\,574 \pm 40.1$ Hz,伴有 3 个陪音;最高音量可达 (-6.84 ± 0.56) dB(表 1)。警戒声的节律见图 3(B1):每一音组平均持续时间中等,音组平均间隔时间也处于中等;1 个音组由 1~3 个音节组成,单音节由 5~6 个脉冲组成,双音节的前 1 音节有 4 个脉冲,后 1 音节有 3 个脉冲;3 个音节的第 1 音节有 5 个脉冲,第 2 音节有 4 个脉冲,第 3 音节有 3 个脉冲;脉冲均由小到大。

(2)挑战声(provoking song):发出警戒声后,如果侵入者还不离开,则会发出挑战声。可能是用其鸣叫来壮大声势。其鸣声较有序,节奏急促。挑战声功率谱见图 3(A2):其频带较宽,伴有 3 个陪音;主频率为 $4\,412 \pm 38.3$ Hz,音量仅次于警戒声(表 1)。挑战声的节律见图 3(B2):每一音组平均持续

时间较长而间隔时间较短;每一音组由 3 个音节组成,第 1 音节有 6 个脉冲,第 2、3 音节有 3 个脉冲;音节平均持续时间、脉冲平均持续时间及平均间隔时间见表 1。

(3)胜利声(victory song):决斗获胜者会发出一种鸣声称之为胜利声。胜利声功率谱见图 3(A3):伴有 3 个陪音,主频率为 $4\,372 \pm 42.6$ Hz,音量较高(表 1)。胜利声的节律见图 3(B3):每一音组平均持续时间较短,平均间隔时间较长;每一音组由 3~4 个音节组成,通常一个音节由 5~6 个脉冲组成;音节平均持续时间、脉冲平均持续时间及平均间隔时间见表 1。

如果新闯入的雄虫听到警戒声后立即离开,则领地的“主人”不再发出后两种鸣声。

2.2.3 求偶声(courting song): 这是有雌虫存在时,雄虫求偶所发出的声音。根据其行为和声学特征可分为 3 种:

(1)欢迎声(welcome song):雌性进入雄性领地时,雄性发出来的一种迎接雌性的声音。欢迎声的功率谱见图 4(A1):其频带较窄,伴有 6 个陪音;主频率为 $4\,468 \pm 36.6$ Hz。欢迎声的节律见图 4(B1):

表 1 迷卡斗蟋 7 种鸣声的声学特征比较 (n = 20)
Table 1 Comparison of the acoustic properties of seven songs in *Velarifictorus micado* (n = 20)

	争斗声 Wrestling song				求偶声 Courting song		
	召唤声 Calling song	警戒声 Warning song	挑战声 Provoking song	胜利声 Victory song	欢迎声 Welcome song	求爱声 Loving song	催促声 Urging song
最大振幅 Peak amplitude (dB)	- 13.42 ± 0.28	- 6.84 ± 0.56	- 6.24 ± 0.47	- 11.30 ± 0.38	- 13.23 ± 0.35	- 17.24 ± 0.73	- 14.28 ± 0.25
频带 Frequency band (Hz)	(2 857 ± 145.5) ~ (6 473 ± 20.7)	(2 824 ± 102.5) ~ (5 832 ± 80.8)	(3 608 ± 122.6) ~ (7 007 ± 100.2)	(2 552 ± 113.4) ~ (6 678 ± 76.7)	(3 804 ± 118.7) ~ (6 862 ± 81.3)	(2 768 ± 120.6) ~ (6 518 ± 84.5)	(2 908 ± 102.7) ~ (5 785 ± 74.5)
主频率 Principal frequency (Hz)	4 568 ± 20.8	4 574 ± 40.1	4 412 ± 38.3	4 372 ± 42.6	4 468 ± 36.6	4 519 ± 46.2	4 459 ± 21.6
陪音个数 Number of upper partials	3	3	3	3	6	5	3
音组 Sound group							
每一音组中所含的音节数 Number of syllable per sound group	4	1 ~ 3	3	3 ~ 4	3 ~ 5	1	3
每一音组持续的时间 Continuous time per a sound group(ms)	850 ± 40	650 ± 50	870 ± 50	800 ± 80	970 ± 50	120 ± 130	610 ± 30
音组间隔时间(s) Interval time between neighbor sound group	1.41 ± 0.04	1.21 ± 0.06	1.17 ± 0.05	1.27 ± 0.09	1.46 ± 0.06	0.18 ± 0.05	0.96 ± 0.26
音节持续时间(ms) Continuous time per a syllable	117 ± 4.50	127 ± 12.8	100 ± 7.48	100 ± 12.8	100 ± 11.3	120 ± 13.5	146 ± 14.7
脉冲间隔时间(ms) Interval time between neighbor pulse	11 ± 0.82	14 ± 2.16	12 ± 1.63	13 ± 2.94	14 ± 2.94	12 ± 1.63	11 ± 1.25
音节所含有的脉冲数 Pulse numbers per a syllable							
单音节中的脉冲数 Pulse numbers for singular syllable	3 ~ 4	5 ~ 6	6	5 ~ 6	5	5	5
双音节中的脉冲数 Pulse numbers for double syllable		I - 4; II - 3	3	3	3	I - 4; II - 4	
多音节中的脉冲数 Pulse numbers per a syllable in poly-syllable		I - 5; II - 4; III - 3	3	3	3	I - 5; II - 4; III - 4	
脉冲持续时间(ms) Continuous time per pulse	25 ± 2.16	22 ± 2.16	20 ± 1.63	24 ± 0.82	23 ± 1.41	26 ± 1.41	24 ± 2.94
品质因数 Quality factor	9.3	16.9	16.3	16.2	13.5	13.2	14.9

I, II, III 表示第 1、第 2 或第 3 音节中的脉冲数 I, II, and III indicate pulse number of the first, second or third syllable.

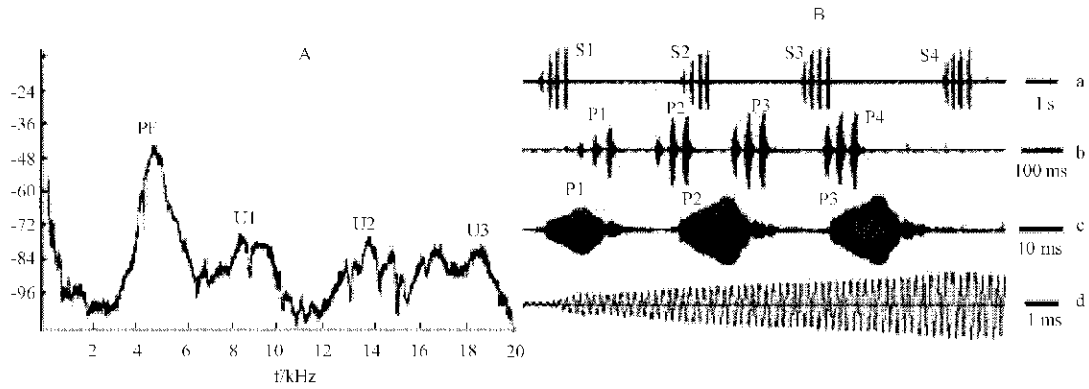


图 2 迷卡斗蟋召唤声的功率谱(A)和示波图(B)

Fig. 2 Power spectra (A) and oscillogram (B) of calling song in *Velarifictorus micado*

PF: 主频率 Principal frequency; U1 ~ U3: 陪音个数 Number of upper partials; a: 音组所含的音节数 Syllable number per sound group; b: 一个音组的扩展波 Expanding oscillogram of a sound group; c: 脉冲群的扩展波形 Expanding oscillogram of pulse group; d: 脉冲的局部扩展波形 Expanding local oscillogram of a pulse; 图 3 和图 4 同 The same for Fig.3 and Fig.4.

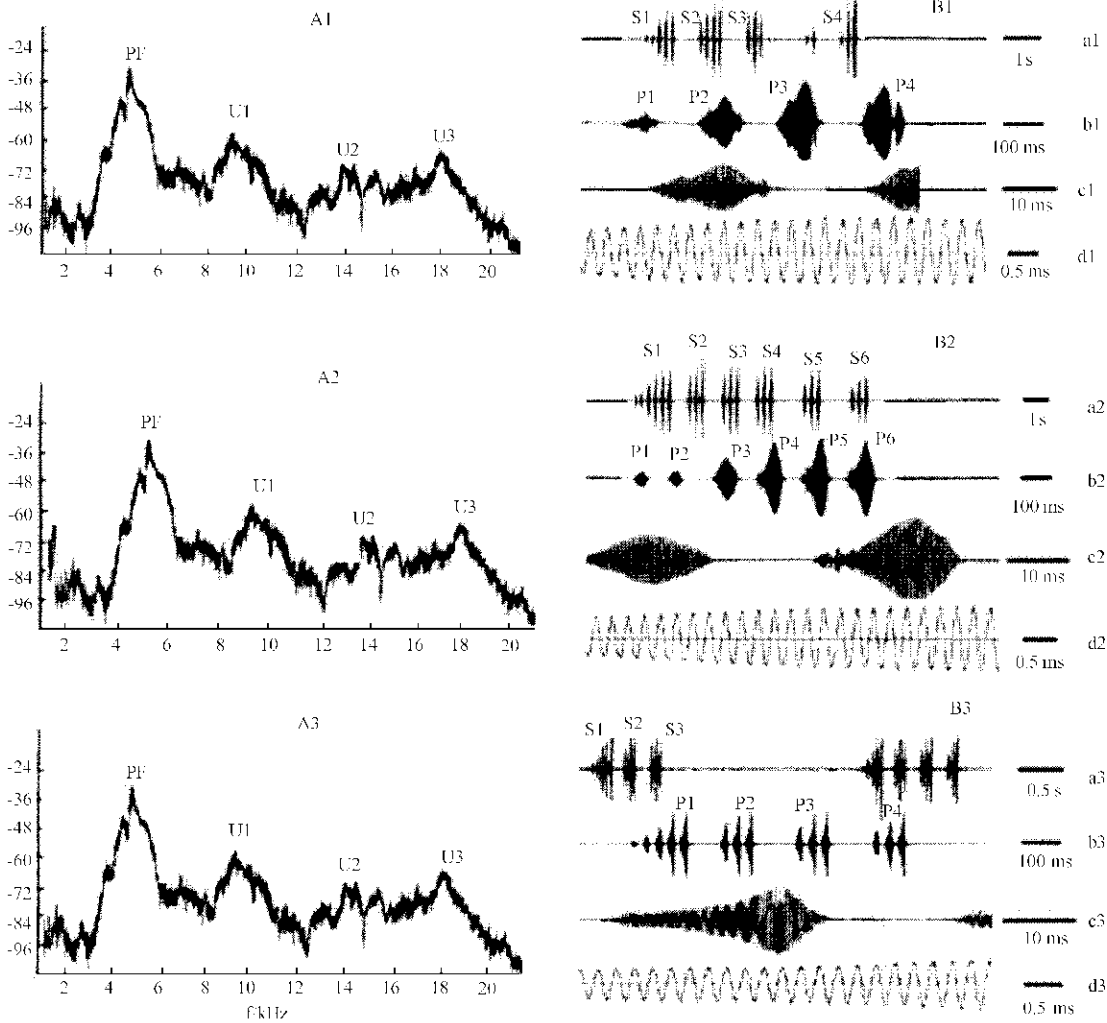


图 3 迷卡斗蟋争斗行为的 3 种鸣声的功率谱(左)和示波图(右)

Fig. 3 Power spectra (left) and oscillogram (right) of 3 forms of wrestling songs within the fight behavior in *Velarifictorus micado*

A1, B1: 警戒声 Warning song; A2, B2: 挑战声 Provoking song; A3, B3: 胜利声 Victory song.

每一音组平均间隔时间较长;每一音组由 3~5 个音节组成,每一音节由 5 个脉冲组成;其余音节由 3 个脉冲组成;脉冲形状相似;音节平均持续时间、脉冲平均持续时间及间隔时间见表 1。

(2)求爱声(loveing song): 如雌虫如约而至,雄虫则向雌虫唱 ”情歌”,以示求爱。求爱声的音量在 7 种声音中最低,为 (-17.24 ± 0.73) dB(表 1)。求爱声功率谱见图 4(A2): 其频带最宽,伴有 5 个以上的陪音;主频率为 $4\,519 \pm 46.2$ Hz。求爱声的节律见图 4(B2): 鸣声节奏有序,以 1 个音节为 1 音组;音节平均持续时间和间隔时间最短,音节几乎连在一起;每一音节由 5 个脉冲组成;音节平均持续时间和间隔

时间、脉冲平均持续时间和平均间隔时间见表 1。

(3)催促声(urgig song): 如果雌性不理睬雄性的求爱时,雄性往往发出催促声。音量较低。催促声功率谱见图 4(A3): 其频带较宽,伴有 3 个陪音;有 3 个高峰,峰值分别为 4 032 Hz、4 459 Hz 和 5 502 Hz,主频率为 $4\,459 \pm 21.6$ Hz。催促声的节律见图 4(B3): 鸣声节奏不甚有序,每一音组持续时间与警戒声相当,平均间隔时间明显长于求爱声而短于欢迎声;每一音组由 3 个音节组成;第 1 音节由 5 个脉冲组成,其余音节由 4 个脉冲组成;脉冲平均持续时间和平均间隔时间、音节平均持续时间和间隔时间见表 1。

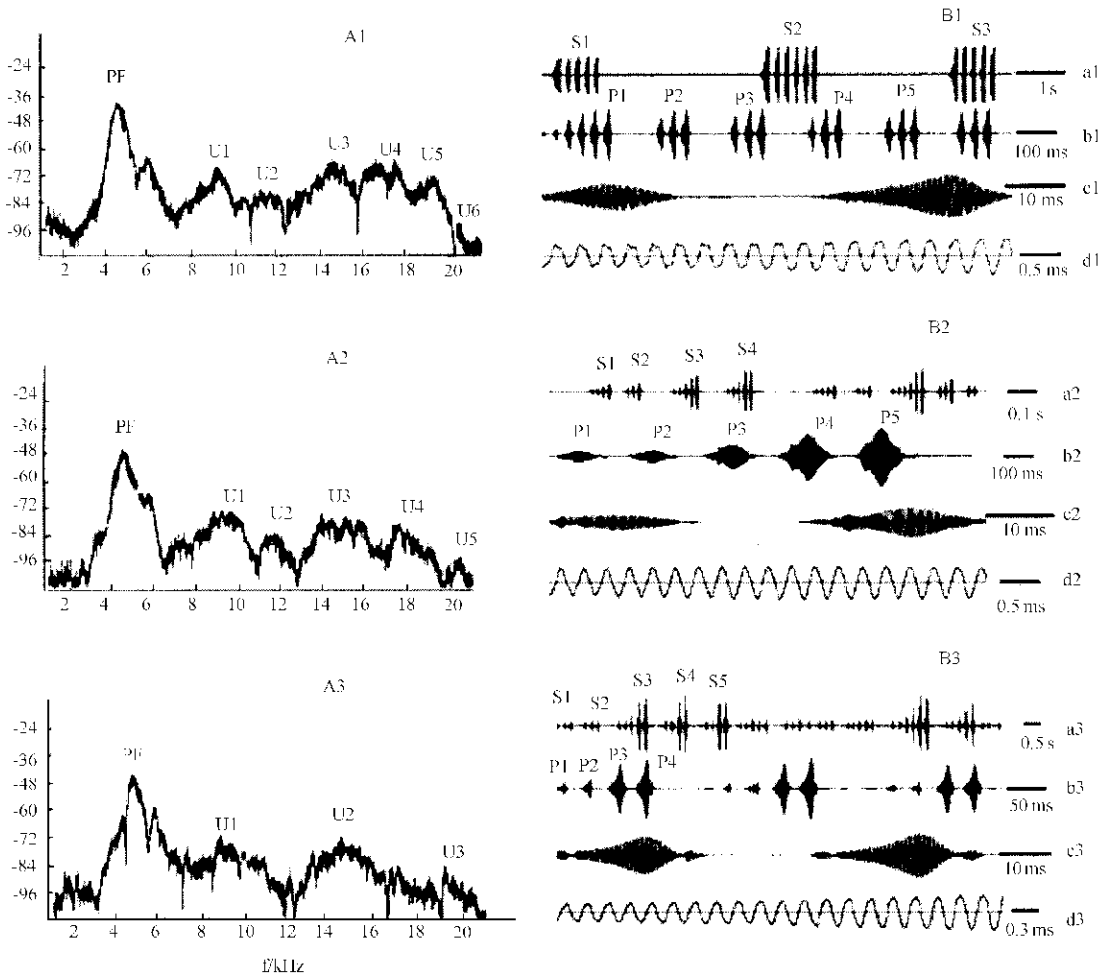


图 4 迷卡斗蟋求偶行为的 3 种鸣声的功率谱(左)和示波图(右)

Fig. 4 Power spectra (left) and oscillogram (right) of three forms of courting songs within the courting behavior in *Velarifictorus micado*

A1, B1: 欢迎声 Welcome song; A2, B2: 求爱声 loveing song; A3, B3: 催促声 Urging song.

2.4 迷卡斗蟋 7 种鸣声特征分析比较

从表 1 可看到,迷卡斗蟋的 7 种鸣声中召唤声、挑战声、胜利声和欢迎声的音组持续时间较长,其中欢迎声最长,为 0.97 ± 0.05 s,而催促声的音组持续

时间最短,为 0.61 ± 0.03 s。召唤声、胜利声和欢迎声的音组间隔时间较长,其中欢迎声最长,为 1.46 ± 0.06 s,而求爱声和催促声的音组间隔时间较短,其中催促声的最短,分别为 11 ± 0.82 ms 和 0.96

± 0.26 s。这反映在听觉上是欢迎声又长又缓,而催促声是又短又急。在音节平均持续时间中,召唤声、警戒声和催促声的较长,其中催促声最长,为 140 ± 14.7 ms。在脉冲平均持续时间中,召唤声、胜利声、求爱声和催促声的较长,其中求爱声最长,为 26 ± 1.41 ms,而挑战声最短,为 20 ± 1.63 ms。在脉冲间隔时间中,警戒声和欢迎声的最长,为 14 ± 2.16 ms 和 14 ± 2.94 ms,而召唤声和催促声的最短,分别为 11 ± 0.82 ms 和 11 ± 1.25 ms。从表 1 中还可以看到,召唤声的各项特征的时间标准误较小,也就是召唤声的音组持续时间、间隔时间、音节持续时间和脉冲持续与间隔时间都很稳定。

迷卡斗蟋的 7 种鸣声中警戒声、挑战声和胜利声的声强较大,其中挑战声最大,达到 (-6.24 ± 0.47) dB,而求爱声的声强最小,低至 (-17.24 ± 0.73) dB。频带以胜利声最宽,催促声次之,求爱声第三,而召唤声最窄。主频率以召唤声最高,警戒声次之,胜利声最低。

7 种鸣声都有陪音,所以迷卡斗蟋鸣声悦耳动听。

3 讨论

发声锉作为雄性蟋蟀的发音器官,其音锉的形状、音齿数目、音齿的排列形状以及发声时双翅的开合角度和程度的不同都可以发出不同的声音。鸣声的差异是由于音锉与刮器的摩擦角度、轻重程度和摩擦频率不同所致。

Mordue 等(1980)把雄性蟋蟀的鸣声分为 3 种:第 1 种为占区鸣叫(召唤声, calling song),其作用为占区和吸引雌性,雄性单独存在时只有此种声音;第 2 种为求偶鸣唱(求偶声, courting song),声音较低且持续时间较短,常伴之清理触角或急速摆动触角;第 3 种鸣声,是在另外雄性闯入其领地时发出的争斗声(wrestling song)。其实,蟋蟀的鸣叫声不止这 3 种,只是人耳难以分辨其细小差异。本研究结果表明,在不同性比条件下,迷卡斗蟋的鸣声可分为 7 种。迷卡斗蟋的雄性个体有占据领地的习性,在其领域范围,发出正常召唤声;召唤声主要在 16:00 至翌日 9:00 发出,尽管在不同时间召唤声有不同的强度,但其节律相同,且有规律,都是 3 个音节组成 1 个音组,而且 1 个音节由 3 个脉冲组成,持续时间、间隔时间相似。当外来雄性接近其领地时,则先发出警戒声;如果外来雄性个体不愿离开并入侵其领

地时,则发出不同于正常鸣声的挑战鸣声;如果双方互不相让,发生争斗;决斗胜利者往往也会发出一种胜利声。警戒声和欢迎声的强度都较高,频带宽度相似。警戒声的强度高于欢迎声,这说明提高声音强度可以起到警告对方使其离开的作用。挑战声和求爱声相比,挑战声的强度明显高于求爱声(求爱声是 7 种声音中声音强度最小的),频带宽度也相差较大。挑战声有威胁对方的作用,而求爱声具有刺激对方(雌蟋)的性兴奋及镇定对方的作用。再一次证明:高音有警戒或威胁作用,“悄悄话”则是动物的情歌。胜利声的强度也较催促声高,频带和高峰个数也相差较大。催促声急促,间隔时间短,持续时间较长,频带较窄,主频率低;这种鸣声可能是求爱声的演变,起着催促和求爱的作用。争斗鸣叫,可能具有隔离生殖的作用,同时可以减少交尾时互相干扰。动物在求偶过程中,需要接受来自各方面的刺激。这些刺激大都具有种的特异性,对于雌雄识别以及是否接受交配起重要的作用。雄性蟋蟀的鸣叫,与生殖有关(Simmons, 1988; 贾志云和蒋志刚, 1999; Shaw, 2000)。通常的鸣声,均具吸引异性的作用。当雌雄相遇并相互识别以后,雄性才会发出求爱鸣叫,即通常所说的求偶声。但作者发现,在求偶至交配的过程中,伴随着求偶行为的变化,雄性个体也会向雌性传达不同含义的求爱声讯,分别表示对雌性的欢迎(欢迎声)、求爱(求爱声)和催促其与之交配(催促声),这些鸣声对成功的交配有至关重要的作用。至于昆虫是如何识别这些声讯信息,一直是行为神经生物学所关注的问题。Pollack(2000)认为:蟋蟀能够识别 30 μ s 以上的声波差异。Crossley(1986)研究发现 *Drosophila malerkotiana* 能够区分脉冲间隔只有 0.4 ms 差异的长、短“歌”的含义。尽管蟋蟀能够识别多大的声波差异还有待进一步研究,但这 7 种鸣声的结构差异是十分明显的,是可以识别的。

以往的研究者主要关注蟋蟀鸣声时域上的差异,很少对鸣声的功率谱进行分析。至于声强的高低、陪音的多少、主频等特征与鸣叫的生物学意义有何关联,还有待进一步研究。

致谢 中国海洋大学电子工程系付圣雪教授对本文提出了宝贵的修改意见,华东师范大学的李恺博士赠送了部分资料,在此表示感谢!

参考文献 (References)

Bennet-Clark HC, Leroy H, Tsacas L. 1980. Species and sex-specific songs

- and courtship behavior in the genus *Zaprinus*. *Anim. Behav.*, 28: 230–255.
- Cai WZ, 1988. The vocalism of insects and its application in classification. *Entomological Knowledge*, 25(1): 41–44. [彩万志, 1988. 昆虫的发音及其分类上的应用. 昆虫知识, 25(1): 41–44]
- Chang HC, Miller DD, 1977. Courtship and mating sounds in species of the *Drosophila* affinis subgroup. *Evolution*, 32: 540–550.
- Chang YL, 2000. The communication of chirp insects. *Bulletin of Biology*, 35(2): 11–13. [常岩林, 2000. 昆虫的鸣声通信. 生物学通报, 35(2): 11–13]
- Chen DH, Lin HF, Li JP, Qiu ZF, 2002. The comparative analysis on the sounds acoustic property of *Gryllus bimaculatus*. *Zoological Research*, 23(4): 288–295. [陈道海, 林焕芳, 李洁萍, 丘占峰, 2002. 双斑蟋鸣声特征与行为关系的初步研究. 动物学研究, 23(4): 288–295]
- Crossley SA, 1986. Courtship sounds and behaviour in the four species of the *Drosophila bipectinata* complex. *Anim. Behav.*, 45: 559–570.
- Crossley SA, McDonajd J, 1980. A method for permanently recording courtship song and courtship behavior simultaneously in *Drosophila*. *Drosoph. Inf. Serv.*, 55: 150–151.
- Fu Q, Zhang ZT, Chen W, Tang XQ, 1999. Inhibition of the second male vibrational signal on reproduction of the brown planthopper *Nilaparvata lugens* (Stål). *Acta Entomologica Sinica*, 42(1): 1–6. [傅强, 张志涛, 陈伟, 唐晓清, 1999. 回放雄虫第二种鸣声对稻褐飞虱生殖过程抑制作用. 昆虫学报, 42(1): 1–6]
- Greenacre ML, Ritchie MG, Byrne BC, 1993. Female song preference and the period gene in *Drosophila*. *Behavior Genetic*, 23: 85–90.
- He Z, Chen NL, 1985. Sound structure of five species of common chirp insects in Beijing. *Acta Zoologica Sinica*, 31(4): 324–330. [何忠, 陈念丽, 1985. 北京地区五种常见鸣虫的鸣声结构. 动物学报, 31(4): 324–330]
- He Z, Chen NL, Xi RH, Chen NS, 1989. The sound structure and acoustic attraction of the mole cricket *Gryllotalpa africana* Palisot et Beauvois. *Acta Zoologica Sinica*, 35(1): 73–81. [何忠, 陈念丽, 席瑞华, 陈宁生, 1989. 非洲蝼蛄的鸣声结构和声引诱. 动物学报, 35(1): 73–81]
- Hoy RR, 1974. Genetic control of acoustic behavior in crickets. *Am. Zool.*, 14: 1 067–1 080.
- Jia ZY, Jiang ZG, 1999. Ethograms and mating behaviors of *Velarifictorus micado* and *Gampsocleis gratiosa*. *Acta Zoologica Sinica*, 45(1): 49–56. [贾志云, 蒋志刚, 1999. 迷卡斗蟋和短翅鸣螽斯的行为谱及交配行为. 动物学报, 45(1): 49–56]
- Kyriacou CP, Hall JC, 1982. The function of courtship song rhythms in *Drosophila*. *Anim. Behav.*, 30: 784–801.
- Kyriacou CP, Hall JC, 1986. Inter-specific genetic control of courtship song production and reception in *Drosophila*. *Science*, 232: 494–497.
- Lei ZR, Chou L, Li L, 1994. The sound characteristics of cicada songs and their significance in classification (Homoptera: Cicadoidea). *Entomotaxonomia*, 16(1): 51–58. [雷仲仁, 周尧, 李莉, 1994. 蝉鸣特征及其在分类学上的意义. 昆虫分类学报, 16(1): 51–58]
- Li K, Zheng ZM, 1999a. Sound characteristics analysis and the identification of six species of *Loxoblemmus* (Orthoptera: Grylloidea). *Entomotaxonomia*, 21(1): 17–21. [李恺, 郑哲民, 1999a. 棺头蟋属六种常见蟋蟀鸣声特征分析与种类鉴定. 昆虫分类学报, 21(1): 17–21]
- Li K, Lian ZM, 1999b. Sound structure analysis of three species of crickets (Orthoptera: Grylloidea) from Hubei Province. *Entomotaxonomia*, 21(3): 187–190. [李恺, 廉振民, 1999b. 湖北省三种长颚蟋鸣声结构分析. 昆虫分类学报, 21(3): 187–190]
- Mordue W, Goldsworthy GJ, Brady J, Blaney WM, 1980. *Insect Physiology*. Oxford: Blackwell Scientific Publications. 92–93.
- Pollack G, 2000. Who, what, where? Recognition and localization of acoustic signals by insects. *Neurobiology of Behavior*, 10: 763–767.
- Römer H, Krusch M, 2000. A gain-control mechanism for processing of chorus sounds in the afferent auditory pathway of the bushcricket *Tettigonia viridissima* (Orthoptera: Tettigoniidae). *J. Comp. Physiol. A.*, 186: 181–191.
- Shaw KL, 2000. Further acoustic diversity in Hawaiian forests: two new species of Hawaiian cricket (Orthoptera: Gryllidae: Trigonidiinae *Laupala*). *Zoological Journal of the Linnean Society*, 129(1): 73–91.
- Shaw KL, Herlihy DP, 2000. Acoustical preference functions and song variability in the Hawaiian cricket *Laupala cerasina*. *Proc. R. Soc. Lond. B Biol. Sci.*, 267: 577–584.
- Shi FM, Yang PL, Jiang SN, 2001. Studies on the songs and stridulatory organs of *Euconocephalus nasutus* (Thunberg) and *E. pallidus* (Redtenbacher). *Zoological Research*, 22(2): 89–92. [石福明, 杨培林, 蒋书楠, 2001. 鼻优草螽和苍白优草螽鸣声和发声器的研究. 动物学研究, 22(2): 89–92]
- Shi FM, Zheng ZM, 1999. Studies on male stridulatory apparatus of *Kuwayamaea* Matsumura & Shiraki and a description of a new species (Orthoptera: Phaneropteridae). *Acta Entomologica Sinica*, 42(4): 401–405. [石福明, 郑哲民, 1999. 桑螽属雌性发音器的研究及一新种记述. 昆虫学报, 42(4): 401–405]
- Simmons LW, 1988. The calling song of the field cricket, *Gryllus bimaculatus* (de Geer): constraints on transmission and its role in intermale competition and female choice. *Anim. Behav.*, 36: 380–394.
- Simmons LW, 2004. Genotypic variation in calling song and female preferences of the field cricket *Teleogryllus oceanicus*. *Anim. Behav.*, 68(2): 313–322.
- von Schilcher F, 1976. The function of pulse song and sine song in the courtship of *Drosophila melanogaster*. *Anim. Behav.*, 24: 622–625.
- Wu FZ, Feng PZ, He Z, 1986. Sound structure and the identification of common cricket in Beijing and Yinchuan. *Acta Entomologica Sinica*, 29(1): 62–66. [吴福桢, 冯平章, 何忠, 1986. 北京及银川常见蟋蟀鸣叫习性与种类鉴定. 昆虫学报, 29(1): 62–66]
- Xie LD, Zheng ZM, 2001. Studies on stridulation file teeth of crickets (Orthoptera: Grylloidea). *Zoological Research*, 22(3): 220–225. [谢令德, 郑哲民, 2001. 蟋蟀音齿的研究(直翅目: 蟋蟀总科). 动物学研究, 22(3): 220–225]
- Yang PL, Chang YL, Lu RS, 2000. Stridulatory character of *Ducetia japonica* Thunberg. *Journal of Guangxi Academy of Science*, 16(3): 138–141. [杨培林, 常岩林, 芦荣胜, 2000. 日本条螽斯鸣声特征的初步研究. 广西科学院学报, 16(3): 138–141]