

# 基于鸣声模型的云南柳莺地理种群关系分析

郑岩<sup>①②</sup> 王江宁<sup>①</sup> 王天山<sup>①</sup> 林聪田<sup>①</sup> 孙悦华<sup>①</sup> 纪力强<sup>①\*</sup>

① 中国科学院动物研究所动物生态与保护生物学院重点实验室 北京 100101;

② 中国科学院大学生命科学学院 北京 100049

**摘要:** 将录自北京、甘肃、四川和陕西 7 个地区共 117 段云南柳莺 (*Phylloscopus yunnanensis*) 的鸣唱样本分别提取短时特征 Mel 倒谱系数 (MFCC), 利用系统聚类方法, 构建云南柳莺不同地理种群鸣声特征之间的树状关系图, 并对云南柳莺地理鸣声差异产生机制的可能因素 (地理距离、海拔等) 进行探讨。这是基于鸣声短时特征的物种识别在研究同一物种不同地理种群关系中的首次尝试。结果显示, 其鸣声地理差异与距离之间没有显著相关性 (Pearson,  $r = -0.036$ ,  $P = 0.762$ ,  $n = 117$ ), 但与海拔存在显著的相关性 (Pearson,  $r = -0.836$ ,  $P < 0.001$ ,  $n = 117$ )。

**关键词:** 云南柳莺; 地域差异; Mel 倒谱系数; 海拔

**中图分类号:** Q958 **文献标识码:** A **文章编号:** 0250-3263 (2017) 05-768-09

## Geographic Population Relationship Analysis of Chinese Leaf Warbler (*Phylloscopus yunnanensis*) Based on Acoustic Model

ZHENG Yan<sup>①②</sup> WANG Jiang-Ning<sup>①</sup> WANG Tian-Shan<sup>①</sup> LIN Cong-Tian<sup>①</sup>  
SUN Yue-Hua<sup>①</sup> JI Li-Qiang<sup>①\*</sup>

① Key Laboratory of Animal Ecology and Conservation Biology, Institute of Zoology, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101;

② College of Life Science, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

**Abstract:** The short time feature Mel frequency cepstral coefficients (MFCC) were extracted (for the process, see Fig. 2) from 117 sound samples of Chinese leaf warbler (*Phylloscopus yunnanensis*), which were collected from 7 regions in Beijing, Gansu, Sichuan and Shaanxi (Table 1, Fig. 1). Then we constructed the cluster tree (Table 2, Fig. 3) of the sound characteristics of different geographic populations by using pattern recognition method. Finally, we discussed the mechanism of geographical variations in songs of Chinese leaf warbler. The results showed that there were no significant differences between MFCC feature of the songs and their distances or habitats (Pearson,  $r = -0.036$ ,  $P = 0.762$ ,  $n = 117$ ). However, the sound of Chinese leaf warbler and altitude showed significant differences (Pearson,  $r = -0.836$ ,  $P < 0.001$ ,  $n = 117$ ). This is the first attempt for geographic population relationship based on short time feature of sound of birds.

**基金项目** 国家自然科学基金项目 (No. 31272286);

\* 通讯作者, E-mail: Ji@ioz.ac.cn;

**第一作者介绍** 郑岩, 女, 硕士研究生; 研究方向: 生物多样性信息学; E-mail: zzzhengyan@163.com.

收稿日期: 2017-02-21, 修回日期: 2017-04-30 DOI: 10.13859/j.cjz.201705006

**Key words:** Chinese leaf warbler (*Phylloscopus yunnanensis*); Geographical variation; Mel frequency cepstral coefficients; Altitude

鸟类鸣声地理变异指同一物种不同地理种群的鸣声差异(雷富民 1999)。鸟类鸣声地理变异是导致两个地理种群生殖前隔离进而新种形成的机制之一(雷富民等 2002), 鸟类鸣声地理变异在新种鉴定及形成的研究中都具有重要意义, 尤其体现在形态和分子数据不足的类群研究中, 比如基于鸣声特征的分析在旋木雀(*Certhia familiaris*)中的应用(Tietze et al. 2008)。

雀形目鸣禽类的鸣唱具有高度的复杂性和多样性, 不同鸟种的鸣唱型存在很大差异(雷富民 2003)。柳莺属在我国现有 41 种 31 亚种, 但有些种和亚种的分类地位仍值得商榷(朱磊等 2012), 由于羽色和形态极为相似, 且多在树冠高层活动, 故在野外较难分辨。云南柳莺(*Phylloscopus yunnanensis*)曾被定名为四川柳莺(*P. sichuanensis*)(孙悦华等 2003), 主要分布于我国中部及东部。Alström 等(1992)对其鸣声进行了描述: 鸣唱经常持续 1 min 及以上, 与山鹪莺(*Prinia criniger*)鸣声相似, 但与四川柳莺的鸣声明显不同, 而鸣叫是一系列多变的、不规则的、响亮而清晰的鸣声。Martens 等(2004)发现不同地域的云南柳莺鸣声的曲目类型存在差异, 但未作具体分析。李金林等(2008)分析了云南柳莺的鸣声特征, 发现不同地区间其鸣唱音节的间隔时间及音素数量存在显著差异, 不同海拔、地区之间个体鸣唱音节间隔时间与海拔成正相关。

物种的鸣声中包含可以识别的物种特异信息(Charrier et al. 2005)。在对不同物种鸣声的研究中一直是以鸣声的音节内容、音节变化以及音节的一些长时平均统计特征为主(Acevedo et al. 2009)。长时平均特征是基于语段(由多个帧组成)对其提取相应的特征参数, 体现了声音的长时变化规律, 比如: 基本频率、最高频率、音节持续时间、音节间隔时间和音节频

率等。曾有研究者利用鸣声的长时平均统计特征进行物种识别, 但是效果不太理想, 比如基于 12 个鸣声统计量对 9 种海豚进行的物种识别, 识别准确率仅为 51.4%(Oswald et al. 2003)。此外, 长时平均统计特征还需要花费大量的时间在音节的前期处理以及特征提取上, 当鸣声资料很多的时候, 这样的处理过程就会很耗时, 而且长时平均特征还会舍弃鸣声中一些信息, 压缩鸣声特性(Cheng et al. 2010), 因此短时特征在提取效率上更优。近年来随着机器学习、模式识别以及语音识别技术发展, 学者开始使用可以被自动化提取的短时特征进行物种研究。短时特征是以一帧声音信号为单位提取声音特征, 能够反映短时间鸣声的频率及能量分布特性, 比如 Mel 频率倒谱系数(Mel-frequency cepstral coefficient, MFCC)、线性预测系数(linear prediction coefficient, LPC)、线性预测倒谱系数(linear prediction cepstrum coefficient, LPCC)等特征参数, 其中 MFCC 谱最为常用。Fox 等(2006)第一次将人类(*Homo sapiens*)语音识别领域的 MFCC 特征应用于人类以外的生物, 以 3 种鸟为研究对象, 通过 MFCC 特征进行物种识别, 识别率达到 71% ~ 96%。Somervuo 等(2006)以 14 种北欧常见雀形目鸟类为研究对象, 利用 MFCC 与高斯混合模型取得了最好为 71.3% 的识别结果。Lee 等(2008)利用高斯混合模型和 MFCC 则在 28 种鸟类的物种识别中取得了 84.06% 的好结果。

可见, 短时特征在物种鸣声识别领域的效果很好, 也取得了丰富的成果; 但基于短时特征的相关研究几乎仅见于基于鸣声的物种识别领域。通过物种鸣声的短时特征, 构建分类关系密切的鸟种不同地理类群之间的关系图, 这种研究尚无人尝试。因此我们想进一步深入, 将这些特征用于鸟类同一物种不同地理种群之

间的鸣声差异与相关性研究中,进而构建分类关系密切的鸟种不同地理类群间的关系图,并试图从这个新的角度解释地理种群间的相互关系。这将会为同一物种不同地理种群之间的关系研究提供一个新的有力的实验依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 实验材料

本研究使用的云南柳莺鸣唱样本为 1997、2002、2005 和 2014 年的 5~7 月期间,分别采集自北京百花山自然保护区、甘肃省莲花山自然保护区 and 四川省龙溪-虹口自然保护区、唐家河自然保护区、宝兴县以及陕西省太白山、长青自然保护区。

百花山自然保护区地处北京西部(39°48'~40°05'N, 115°25'~115°42'E), 最高海拔 1 991 m, 总面积 217.43 km<sup>2</sup>。鸟声采集于海拔 1 600~1 900 m 的针阔混交林。莲花山自然保护区位于甘肃省东南部的康乐、临潭、卓尼、临洮、渭源五县接壤地区(34°56'~34°58'N, 103°44'~103°48'E)。最高海拔 3 578 m, 总面积 125.51 km<sup>2</sup>。鸟声采集于海拔 2 300 m 的针叶林带。龙溪-虹口自然保护区位于四川省都江堰市北部(31°04'~31°22'N, 103°32'~103°43'E), 处于四川盆地向青藏高原的过渡带上, 气候温暖湿润, 地质构造复杂, 为典型的高山峡谷地貌。鸟声采集集中在核心区海拔 2 000 m 以上以巴山冷杉(*Abies fargesii*)为主的针阔混交林带。唐家河自然保护区位于四川省青川县

境内(32°32'~32°41'N, 104°37'~104°53'E), 总面积为 400 km<sup>2</sup>。鸟声采集主要在其海拔 2 500 m 左右的亚高山针叶林带。宝兴县位于四川省西部, 总面积 3 114 km<sup>2</sup>, 鸟声采集主要集中在海拔 2 700 m 左右的针叶林带。太白山样本主要采集于厚畛子, 位于秦岭北麓、黑河上游, 该区森林茂密, 气候温暖湿润, 最高海拔 2 800 m, 最低海拔 1 200 m。鸟声采集于海拔 1 700 m 左右的落叶栎林带。长青自然保护区位于陕西省秦岭中段南坡的洋县北部(33°19'~33°44'N, 107°17'~107°55'E), 总面积 300 km<sup>2</sup>。鸟声采集主要在核心区海拔 2 500 m 左右的针阔混交林带。云南柳莺录音地点分布见图 1。

云南柳莺的繁殖期为每年的 5~7 月, 鸣唱时间多集中在清晨和黄昏, 因此本研究的录音时间一般在上午 6 至 8 时之间。在野外通过 Sony WM-D6C 录音机和 Sennheiser 定向话筒采集云南柳莺鸣唱声, 格式为 16 位 44 100 Hz。云南柳莺的鸣声采集信息见表 1, 根据采样地区将鸣唱样本分为不同的组, 也即不同的地理种群, 分为 A ( $n=19$ )、B ( $n=15$ )、C ( $n=17$ )、D ( $n=6$ )、E ( $n=8$ )、F ( $n=10$ )、G ( $n=42$ ) 7 组。117 段录音来自不同个体, 每段鸣唱录音在 30 s 之内。音频中每一声鸟鸣之间往往间隔较长时间, 空白时间不适合提取鸣声特征, 因此需要进行去空白的预处理(时长阈值为 30 ms), 通过 C#编程实现。本文统计分析软件为 R 3.3.2 (Mathsoft, Cambridge, USA)。

表 1 云南柳莺鸣声采集信息

Table 1 Information of collected vocalizations of the Chinese Leaf Warbler

ID	采样地点 Location	海拔 (m) Altitude	样本数 (n) Samples	采集时间 Time
A	甘肃省莲花山 Lianhuashan, Gansu	2 300	19	2014
B	四川省龙溪-虹口 Longxi-hongkou, Sichuan	2 000	15	2002
C	陕西省太白山 Taibaishan, Shaanxi	1 700	17	1997
D	陕西省长青 Changqing, Shaanxi	2 500	6	2005
E	四川省唐家河 Tangjiahe, Sichuan	2 500	8	2005
F	四川省宝兴 Baoxing, Sichuan	2 700	10	2002
G	北京百花山 Baihuashan, Beijing	1 600 ~ 1 900	42	2014

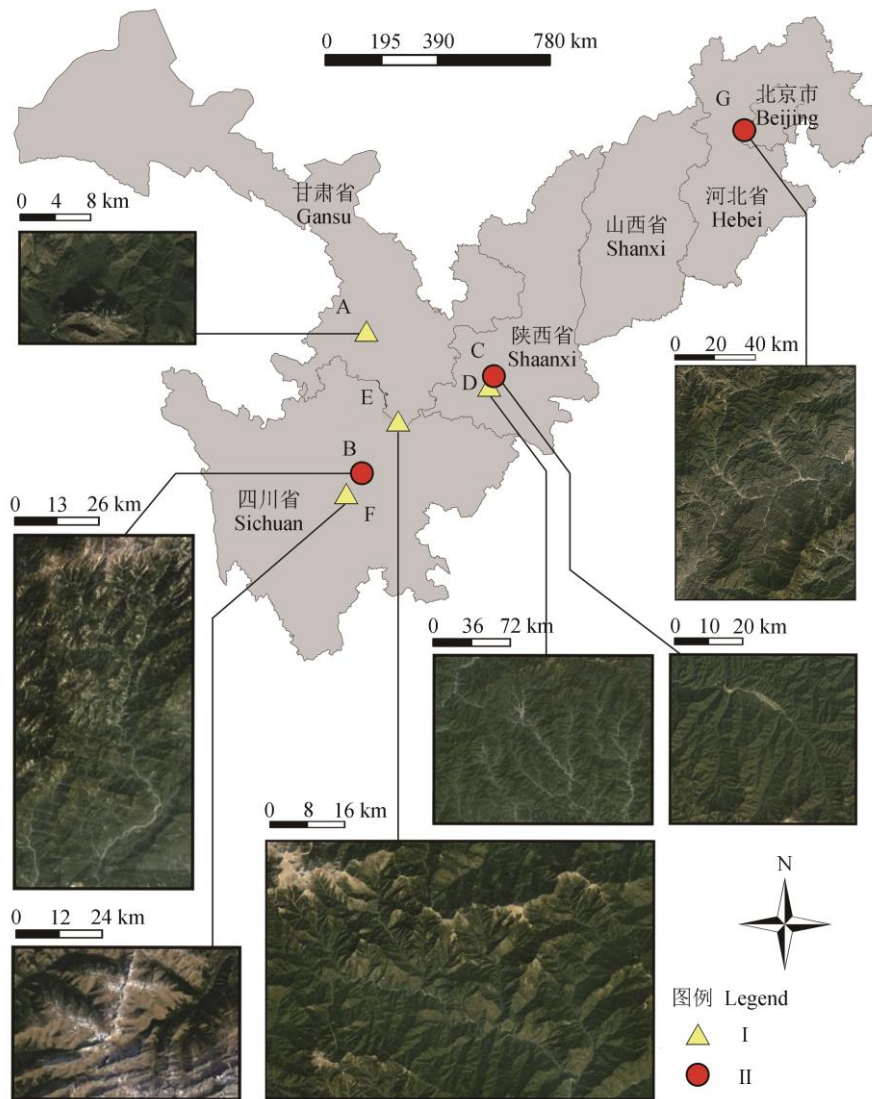


图 1 云南柳莺录音地点分布图

Fig. 1 Location of recording sites of Chinese Leaf Warbler

基于 MFCC 特征聚类，所有样本聚为 2 个主要分支，分别称为 I 和 II。地区分别为：A. 甘肃莲花山；B. 四川省龙溪-虹口；C. 陕西省太白山；D. 陕西省长青；E. 四川省唐家河；F. 四川省宝兴；G. 北京市百花山。地图来自 Google Earth。

Clustering based on MFCC features, all samples were clustered into two main branches, which were called I and II. Regions: A. Lianhuashan, Gansu; B. Longxi-hongkou, Sichuan; C. Taibaishan, Shaanxi; D. Changqing, Shaanxi; E. Tangjiahe, Sichuan; F. Baoxing, Sichuan; G. Baihuashan, Beijing. The map was downloaded from Google Earth.

## 1.2 特征提取

我们采用 Mel 倒谱系数 (MFCC) 作为声音特征进行分析。MFCC 是目前最常用的短时特征参数。MFCC 的提取基于 Mel 频率域进行，因此需先将鸣声信号的物理频率映射到 Mel 频

率域，其转换关系如下： $F_{\text{mel}} = 2595 \lg(1 + f/700)$ ，式中， $F_{\text{mel}}$  为 Mel 频率， $f$  为实际频率，单位 Hz。

MFCC 特征的提取过程如图 2 所示：鸣声信号经分帧加窗处理后变为短时信号，本文中

帧长为 1 541 个采样点，步长为 771 个采样点，窗函数使用汉明窗，窗长 35 ms，帧移 17 ms。然后经过快速傅里叶变换（fast Fourier transform, FFT）将时域信号转换为频域信号并计算短时能量谱之后，通过一系列三角形 Mel 频率滤波器组，每一个三角形滤波器频率带宽内所有信号幅度的加权和作为某个带通滤波器的输出，计算公式如下：

$$m(l) = \sum_{k=o(l)}^{k=h(l)} w_l(k) |X[k]|, l = 1, 2, \dots, L,$$

式中， $m(l)$ 为每一个带通滤波器的输出值， $h(l)$ 、 $o(l)$ 分别为第  $l$  个三角形滤波器的上限、下限频率， $w_l(k)$ 为斜率， $X[k]$ 为音频信号幅度谱， $L$ 为三角滤波器的个数，本文中  $L$  为 24。

通过滤波器后的输出结果取对数之后，利用离散余弦变换将其对数功率谱变换回时域，去除各维信号之间的相关性，将信号映射到低维空间从而得到 MFCC 特征参数，本文中维数为 23 维。本实验中提取 MFCC 通过 C#编程实现。

### 1.3 特征聚类

聚类算法是一种非监督模式识别的重要方法。它根据某种相似度量，对样本空间进行分组，使组间数据相似距离较大，组内距离之间相似度较小，从而实现自动分类（袁萌棠 1995）。本研究使用最常用的系统聚类方法，聚类距离使用欧式距离，聚类中心点使用节点的平均距离，本实验中通过 C#编程实现。

云南柳莺不同地理种群的 MFCC 特征集得出后，通过以上聚类算法分析不同地理种群代表特征向量之间的相似性关系。基于它们之间的相似性关系以及聚类分析，构建基于鸣声代表特征的柳莺不同地理种群之间鸣声特征的关系图谱。

## 2 结果

### 2.1 MFCC 特征向量

对 117 个样本重复 3 次提取 MFCC 特征，每个特征含 23 个特征值（ $v_1 \sim v_{23}$ ），为便于比较分析，通过 Fisher 准则（Wang et al. 2009）选出最具代表性的一维向量  $v_1$ （Fisher = 0.64）。通过 R 进行描述性统计分析可知，A 组特征向量为  $-3.025 \pm 0.351$  ( $n = 19$ )，B 组特征向量为  $0.981 \pm 0.126$  ( $n = 15$ )，C 组特征向量为  $-0.099 \pm 0.153$  ( $n = 17$ )，D 组特征向量为  $-4.443 \pm 0.121$  ( $n = 6$ )，E 组特征向量为  $-4.986 \pm 0.316$  ( $n = 8$ )，F 组特征向量为  $-3.501 \pm 0.124$  ( $n = 10$ )，G 组特征向量为  $-0.445 \pm 0.325$  ( $n = 42$ )。

### 2.2 基于 MFCC 特征的聚类结果

基于云南柳莺鸣声 MFCC 特征聚类的距离矩阵见表 2，表中为 7 个组两两之间的聚类距离。

基于表 2 获得聚类树状图（图 3），采集于 7 个地区的全部样本总共聚为 2 个主要分支，A 组甘肃莲花山种群、F 组四川省宝兴种群、D 组陕西省长青种群和 E 组四川省唐家河种群聚

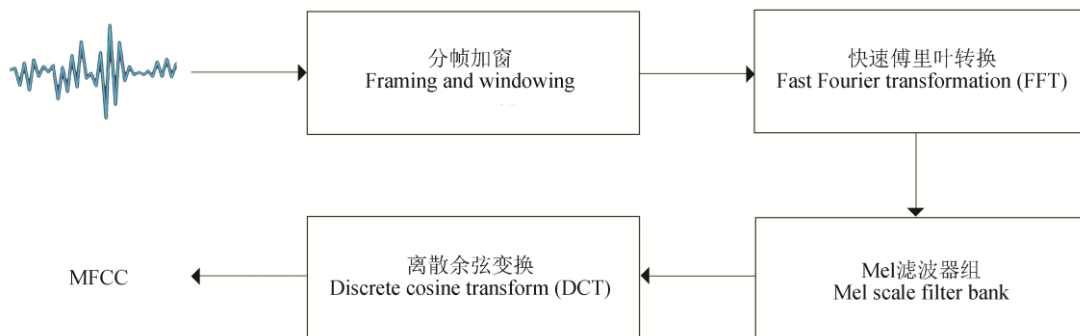


图 2 MFCC 特征的提取过程

Fig. 2 Extraction process of MFCC feature

表 2 基于云南柳莺鸣声 MFCC 特征聚类的距离矩阵

Table 2 Distance matrix based on MFCC feature of songs of Chinese Leaf Warbler

ID	A	B	C	D	E	F	G
A		2.07	7.55	2.52	4.28	8.69	8.13
B	2.07		8.18	2.59	4.11	9.50	9.00
C	7.55	8.18		8.19	9.73	4.81	3.20
D	2.52	2.59	8.19		3.98	9.02	8.70
E	4.28	4.11	9.73	3.98		10.49	10.20
F	8.69	9.50	4.81	9.02	10.49		2.73
G	8.13	9.00	3.20	8.70	10.20	2.73	

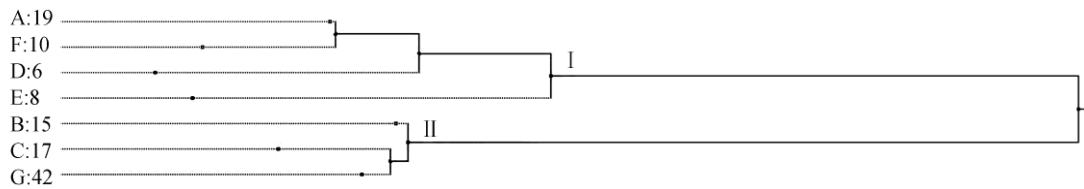


图 3 基于云南柳莺鸣声 MFCC 特征的聚类树状图

Fig. 3 The cluster result based on MFCC feature of songs of Chinese Leaf Warbler

A. 甘肃莲花山; B. 四川省龙溪-虹口; C. 陕西省太白山; D. 陕西省长青; E. 四川省唐家河; F. 四川省宝兴; G. 北京市百花山; 图中数字为类中样本数。

A. Lianhuashan, Gansu; B. Longxi-hongkou, Sichuan; C. Taibaishan, Shaanxi; D. Changqing, Shaanxi; E. Tangjiahe, Sichuan; F. Baoxing, Sichuan; G. Baihuashan, Beijing. The number means the number of all inclass-elements.

成一个主要分支，称为聚类 I；B 组四川省龙溪-虹口种群、C 组陕西省太白山种群和 G 组北京百花山种群聚成另一个主要分支，称为聚类 II；来自 A 组甘肃莲花山种群的 19 个样本、B 组四川省龙溪-虹口种群的 15 个样本，C 组陕西省太白山种群的 17 个样本，D 组陕西省长青种群的 6 个样本、E 组四川省唐家河种群的 8 个样本、F 组四川省宝兴种群的 10 个样本和 G 组北京百花山种群的 42 个样本都聚在各自所属的地区，成为 1 个小分支，共 7 个小分支。

聚类 I 中的海拔分别为 A 组甘肃莲花山种群 2 300 m，F 组四川省宝兴种群 2 700 m，D 组陕西省长青种群 2 500 m，E 组四川省唐家河种群 2 500 m，海拔都位于 2 000 m 以上；聚类 II 中的海拔，B 组四川省龙溪-虹口种群为 2 000 m，C 组陕西省太白山种群为 1 700 m，G 组北京百花山种群为 1 600 ~ 1 900 m，海拔都位于 2 000 m 及以下。而通过 R 的分析结果也显示，云南柳

莺不同地区鸣声的 MFCC 特征参数与海拔存在显著相关性 (Pearson,  $r = -0.836$ ,  $P < 0.001$ ,  $n = 117$ )。

云南柳莺不同地区生境类型聚类结果见表 3，聚类 I 中 A 组甘肃莲花山种群和 F 组四川省宝兴种群生境类型为针叶林，而 D 组陕西省长青种群为针阔混交林，E 组四川省唐家河种群为亚高山针叶林；聚类 II 中 B 组四川省龙溪-虹口种群和 G 组北京百花山种群为针阔混交林，而 C 组陕西省太白山种群为落叶栎林。生境类型同为针阔混交林的 B 组四川省龙溪-虹口种群、D 组陕西省长青种群和 G 组北京百花山种群没有聚在一起。聚类结果并没有与其生境类型表现一致。

云南柳莺录音地点分布图 (图 1) 显示，同在四川省的 B 组龙溪-虹口种群、E 组唐家河种群和 F 组宝兴种群中，E 组和 F 组被归于聚类 II，而 B 组却被归于聚类 I；同在陕西省的

表 3 云南柳莺不同地区生境类型与聚类结果

Table 3 Habitat and cluster results of Chinese Leaf Warbler in different regions

ID	采样地点 Location	生境类型 Habitat	聚类结果 Cluster result
A	甘肃省莲花山 Lianhuashan, Gansu	针叶林 Conifer forest	I
B	四川省龙溪-虹口 Longxi-hongkou, Sichuan	针阔混交林 Conifer-deciduous mixing forest	II
C	陕西省太白山 Taibaishan, Shaanxi	落叶栎林 Deciduous oak forest	II
D	陕西省长青 Changqing, Shaanxi	针阔混交林 Conifer-deciduous mixing forest	I
E	四川省唐家河 Tangjiahe, Sichuan	亚高山针叶林 subalpine conifer forest	I
F	四川省宝兴 Baoxing, Sichuan	针叶林 Conifer forest	I
G	北京百花山 Baihuashan, Beijing	针阔混交林 Conifer-deciduous mixing forest	II

C 组太白山种群和 D 组长青种群也并未被归于同一个聚类。为便于比较 MFCC 参数与各地理种群距离之间的关系,本实验以北京为基准点,通过 ArcGIS 10.4 (Esri, Redlands, USA) 软件确定各地区到北京的距离,其中甘肃省莲花山到北京的距离为 1 495.032 km,四川省龙溪-虹口到北京的距离为 1 785.358 km,陕西省太白山到北京的距离为 1 220.421 km,陕西省长青到北京的距离为 1 304.539 km,四川省唐家河到北京的距离为 1 578.246 km,四川省宝兴到北京的距离为 1 903.138 km。通过 R 3.3.2 分析 MFCC 特征与距离的关系,二者并不存在显著相关性 (Pearson,  $r = -0.036$ ,  $P = 0.762$ ,  $n = 117$ )。这表明云南柳莺不同地区的鸣声相近性可能并不是依照其地理相近程度聚类。

### 3 讨论

不同地理种群鸣声差异产生机制的可能因素包括:生境类型、海拔、遗传差异、年际变化等。不同频率的声音在不同生境下传播速度不同,从而影响鸟类声音分化 (Nicholls et al. 2006)。研究表明,生活在密林中的鸟种相比开阔地中的同类,其鸣声频率更低,频率幅度变化也更小 (Tubaro et al. 1995, Irwin 2000, Slabbekoorn et al. 2002, Nicholls et al. 2006, van Dongen et al. 2006),在本研究中,如表 3 所示,云南柳莺不同地区鸣声基于 MFCC 特征的聚类结果并未与其生境类型表现一致。李金林等

(2008) 对云南柳莺鸣声基于长时平均统计特征的研究显示,云南柳莺不同地区之间个体鸣唱音节间隔时间与海拔成正相关。在本研究中,对 MFCC 特征参数与海拔高度的分析结果显示,云南柳莺不同地区鸣声的 MFCC 特征参数与海拔存在显著相关性 (Pearson,  $r = -0.836$ ,  $P < 0.001$ ,  $n = 117$ )。

不同地理种群的鸣声差异还可能受遗传差异影响。研究表明,不同地区种群间的遗传差异使鸟类的相关结构或发声器官发生了微小改变,从而导致鸣声差异 (Grapputo et al. 1998, Irwin 2000, Irwin et al. 2001, Mennill 2001, Laiolo et al. 2002, Slater 2003, Stewart et al. 2008, Toews et al. 2008),但目前尚无不同地区云南柳莺之间的遗传研究,这可作为进一步研究的一个方向。本研究在鸣声采集时间方面,A 组甘肃莲花山种群和 G 组北京百花山种群的录制时间为 2014 年,B 组四川省龙溪-虹口种群和 F 组四川省宝兴种群的录制时间为 2002 年,C 组陕西省太白山种群的录制时间为 1997 年,D 组陕西省长青种群和 E 组四川省唐家河种群的录制时间为 2005 年。时间间隔较长,所以不排除云南柳莺不同地理种群鸣声差异的产生也可能是由于各地区鸣声存在年际变化。时间尺度和空间尺度相结合进行领域鸣声差异研究的工作还有待进一步深入。

综上,短时特征在分析云南柳莺鸣声地理差异上具有明显的效果,尤其可以确定其鸣声

受海拔影响明显, 而李金林等(2008)基于云南柳莺鸣声的长时平均统计特征的研究结果也显示不同地区之间个体鸣唱音节间隔时间与海拔成正相关(Pearson,  $r = 0.425$ ,  $P = 0.03$ ,  $n = 26$ ), 但长时平均统计特征需要通过软件人为选出各段鸣唱, 耗时且人为影响大, 而短时特征则可通过编程实现自动化提取。至于短时特征分析种内鸣声地理差异是否也可应用于其他种群, 也可成为下一个研究方向。

**致谢** 感谢中国科学院动物研究所鸟类生态学教研组方昀、胡运彪、石美、楼瑛强、宋凯在野外录音及录音材料整理工作中所提供的帮助。

## 参 考 文 献

- Acevedo M A, Corrada-Bravo C J, Corrada-Bravo H, et al. 2009. Automated classification of bird and amphibian calls using machine learning: A comparison of methods. *Ecological Informatics*, 4(4): 206–214.
- Alström P E R, Olsson U, Colston P R. 1992. A new species of *Phylloscopus* warbler from central China. *Ibis*, 134(4): 329–334.
- Charrier I, Sturdy C B. 2005. Call-based species recognition in black-capped chickadees. *Behavioural Processes*, 70(3): 271–281.
- Cheng J, Sun Y, Ji L. 2010. A call-independent and automatic acoustic system for the individual recognition of animals: A novel model using four passerines. *Pattern Recognition*, 43(11): 3846–3852.
- Fox E J S, Roberts J D, et al. 2006. Text-independent speaker identification in birds. *Pittsburgh Pennsylvania: Ninth International Conference on Spoken Language Processing*, 1(5): 2122–2125.
- Grapputo A, Pilastro A, Marin G. 1998. Genetic variation and bill size dimorphism in a passerine bird, the reed bunting *Emberiza schoeniclus*. *Molecular Ecology*, 7(9): 1173–1182.
- Irwin D E. 2000. Song variation in an avian ring species. *Evolution*, 54(3): 998–1010.
- Irwin D E, Irwin J H, Price T D. 2001. Ring species as bridges between microevolution and speciation. *Genetica*, 112(1): 223–243.
- Laiolo P, Rolando A. 2002. The begging call of the Red-billed Cough *Pyrrhonorax pyrrhonorax*: An analysis of its spectrotemporal variability. *Ardea*, 90(1): 139–147.
- Lee C H, Han C C, Chuang C C. 2008. Automatic classification of bird species from their sounds using two-dimensional cepstral coefficients. *IEEE Transactions on Audio, Speech, and Language Processing*, 16(8): 1541–1550.
- Martens J, Tietze D T, Eck S, et al. 2004. Radiation and species limits in the Asian Pallas's warbler complex (*Phylloscopus proregulus* s.l.). *Journal of Ornithology*, 145(3): 206–222.
- Mennill D J. 2001. Song characteristics and singing behavior of the Mangrove Warbler (*Dendroica petechia bryanti*). *Journal of Field Ornithology*, 72(3): 327–337.
- Nicholls J A, Goldizen A W. 2006. Habitat type and density influence vocal signal design in satin bowerbirds. *Journal of Animal Ecology*, 75(2): 549–558.
- Oswald J N, Barlow J, Norris T F. 2003. Acoustic identification of nine delphinid species in the eastern tropical Pacific Ocean. *Marine Mammal Science*, 19(1): 20–37.
- Slabbekoom H, Smith T B. 2002. Habitat-dependent song divergence in the little greenbul: an analysis of environmental selection pressures on acoustic signals. *Evolution*, 56(9): 1849–1858.
- Slater P J B. 2003. Fifty years of bird song research: a case study in animal behaviour. *Animal Behaviour*, 65(4): 633–639.
- Somervuo P, Harma A, Fagerlund S. 2006. Parametric representations of bird sounds for automatic species recognition. *IEEE Transactions on Audio, Speech, and Language Processing*, 14(6): 2252–2263.
- Stewart K A, MacDougall-Shackleton E A. 2008. Local song elements indicate local genotypes and predict physiological condition in song sparrows *Melospiza melodia*. *Biology Letters*, 4(3): 240–242.
- Tietze D T, Martens J, Sun Y H, et al. 2008. Evolutionary history of treecreeper vocalisations (Aves: *Certhia*). *Organisms Diversity & Evolution*, 8(4): 305–324.
- Toews D P L, Irwin D E. 2008. Cryptic speciation in a Holarctic passerine revealed by genetic and bioacoustic analyses. *Molecular Ecology*, 17(11): 2691–2705.
- Tubaro P L, Segura E T. 1995. Geographic, ecological and



- subspecific variation in the song of the Rufous-Browed Peppershrike (*Cyclarhis Gujanensis*). *Condor*, 97(3): 792–803.
- van Dongen W F D, Mulder R A. 2006. Habitat density, song structure and dialects in the Madagascar paradise flycatcher *Terpsiphone mutata*. *Journal of avian Biology*, 37(4): 349–356.
- Wang S, Li D, Wei Y, et al. 2009. Feature selection method based on fisher's discriminant ratio for text sentiment classification. Springer Berlin Heidelberg: International Conference on Web Information Systems and Mining, 88–97.
- 雷富民. 1999. 鸟类鸣声结构地理变异及分类意义. *动物分类学报*, 24(2): 232–239.
- 雷富民, 王钢, 尹祚华. 2003. 鸟类鸣唱的复杂性和多样性. *动物分类学报*, 28(1): 163–171.
- 雷富民, 王钢. 2002. 鸟类鸣声行为对其物种分化和新种形成的影响. *动物分类学报*, 27(3): 641–648.
- 李金林, 孙悦华, Jochen MARTENS, 等. 2008. 云南柳莺鸣声特点及地理差异的初步分析. *动物学杂志*, 43(3):126–130.
- 孙悦华, 毕中霖. 2003. 四川柳莺实为云南柳莺的同物异名. *动物学杂志*, 38(6): 109.
- 袁萌棠. 1995. 概率论与数理统计. 北京: 中国人民大学出版社.
- 朱磊, 贾陈喜, 孙悦华. 2012. 中国柳莺属鸟类分类研究进展. *动物学杂志*, 47(3): 134–146.