

## 普通话腭裂声门塞音声学与音位特征的量化研究

曹旻玥<sup>1</sup>, 白云<sup>2</sup>, 朱孟贤<sup>1</sup>, 汪彬昺<sup>1</sup>, 李盛<sup>1</sup>, 陈霏<sup>3</sup>, 姜成惠<sup>1</sup>, 江宏兵<sup>1</sup>

**[摘要]** **目的** 探索普通话腭裂声门塞音的声学与音位特征。**方法** 从腭裂语音数据库中提取将目标音节中声母为/g/、/j/或/s/替代为声门塞音的音节语料样本;从正常语音数据库中提取相匹配的正常语料样本作为对照。运用声学分析软件Praat<sup>®</sup> 6.1.09,提取音节发音时长、音节中元音共振峰、元音矩阵及辅音谱矩等参数,进行时域与频域相关性分析,同时探究被声门塞音替代的声母(/g/、/j/、/s/)的音位差异特征。**结果** 在/g/、/j/、/s/上,腭裂患者音节发音时长、/a/F1值、/i/F2值,以及声母M1、M2、M3、M4值等,与对照组存在显著性差异( $P<0.05$ );且音节发音时长与M1值呈显著负相关( $r=-0.595, P<0.001$ )。此外,患者组M1值与F1值亦呈显著正相关( $r=0.243, P<0.05$ )。被声门塞音替代的不同目标音比较发现,患者组的辅音发音时长和M3、M4值存在显著的音素间差异(时长: $P<0.001$ ;M3、M4: $P<0.05$ )。**结论** 本研究系统分析普通话腭裂声门塞音的声学特征,并对不同目标音替代模式进行音位差异量化分析,结果提示腭裂患者可能通过调整声门塞音时长特征与频谱特征等实现音位区分,这一结果为解析腭裂语音的音韵机制及声门塞音的发生机制提供参考。

**[关键词]** 腭裂语音;共振峰;频谱矩分析;声学分析;音位特征

**[中图分类号]** R782.22 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1003-9872(2026)02-0089-08

**[doi]** 10.13591/j.cnki.kqyx.2026.02.002

## Acoustic and phonemic features of glottal stops in Mandarin cleft palate speech: A quantitative study

CAO Minyue, BAI Yun, ZHU Mengxian, WANG Binbing, LI Sheng, CHEN Fei, JIANG Chenghui, JIANG Hongbing. (Department of Oral and Maxillofacial Surgery, The Affiliated Stomatological Hospital of Nanjing Medical University, State Key Laboratory Cultivation Base of Research, Prevention and Treatment for Oral Diseases, Jiangsu Province Engineering Research Center of Stomatological Translational Medicine, Nanjing 210029, China)

**Abstract:** **Objective** To investigate the acoustic characteristics and phonological features of glottal stops in Mandarin-speaking individuals with cleft palate. **Methods** Consonant and vowel (CV) syllable speech samples with glottal stops replacing the initial consonants /g/, /j/, and /s/ were extracted from the cleft palate speech database as the patient group, while two CV syllable speech samples from healthy volunteers served as the control group. Using the Praat<sup>®</sup> 6.1.09, parameters including syllable duration, the first two formants (F1, F2), the vowel space, and spectral moments (M1-M4) of the consonant were extracted. Time-domain and frequency-domain correlation analyses were conducted, and phonological differences among the target consonants (/g/, /j/, /s/) were examined. **Results** Statistically significant differences ( $P<0.05$ ) were identified between the cleft group and the control group in terms of syllable duration, the F1 value of the vowel /a/, the F2 value of the vowel /i/, and the spectral moments (M1-M4) of the initial consonants. Within the cleft group, a negative correlation was observed between syllable duration and M1 ( $r=-0.595, P<0.001$ ). Furthermore, in the cleft group, M1 and F1 demonstrated a significant positive correlation ( $r=0.243, P<0.05$ ). When comparing glottal stops across different target consonants, significant inter-phonemic differences were found in consonant duration and the values of M3/M4 (duration:  $P<0.001$ ; M3/M4:  $P<0.05$ ). **Conclusion** This research offers a comprehensive analysis of the acoustic features associated with glottal stop substitution in Mandarin-speaking adults with cleft palate. The study introduces an innovative approach to quantifying phonological distinctions in substitution patterns across different target consonants. It suggests that patients may be able to achieve phonemic differentiation by adjusting the duration and spectral characteristics of glottal stops. These insights contribute to a deeper understanding of the phonological mechanisms underlying cleft palate speech and the production of glottal stops.

基金项目:国家自然科学基金(82302874);江苏省科教能力提升工程——江苏省研究型医院(YJXYJSDW4),江苏省医学创新中心(CXZX202227)

作者单位:1 南京医科大学附属口腔医院口腔颌面外科,江苏省口腔疾病研究重点实验室,江苏省口腔转化医学工程研究中心,江苏南京(210029);2 西安市中医医院口腔科,陕西西安(710021);3 南方科技大学电子与电气工程系,广东深圳(518055)

通信作者:姜成惠 E-mail:jiangchenghui\_26@163.com

江宏兵 E-mail:jhb@njmu.edu.cn

**Key words:** cleft palate speech; formant; spectral moment analysis; acoustic analysis; phonological features

Stomatology, 2026, 46(2): 89-96

唇腭裂(cleft lip and/or palate, CLP)作为口腔

颌面部最常见的先天性畸形<sup>[1-2]</sup>,其发音器官解剖结构异常导致患者丧失正常发音基础,引发一系列异常发音模式,成为腭裂患者最显著的功能障碍。根据产生机制差异,腭裂语音障碍可分为被动型腭裂语音(passive cleft palate speech, PCPS)与主动型腭裂语音(active cleft palate speech, ACPS):前者是由腭部裂隙或腭咽闭合不全直接导致的发音障碍,常表现为高鼻音和鼻漏气;后者为代偿腭裂缺陷而采用非正常构音部位(如声门、喉)发声,多表现为声门停顿音、咽擦音等。值得关注的是,即使接受修复手术,ACPS仍可能持续存在<sup>[2-5]</sup>,且矫治难度大、周期长。

现有研究已采用声学分析技术对腭裂语音开展定量探索。刘倪<sup>[6]</sup>通过检测腭裂术后/a/、/i/、/u/的共振峰频率及起音方式、基频、舌位、鼻音特征等参数,发现起音方式异常者更易维持/u/的正确舌位,而正常起音方式者更易出现舌位异常;元音/a/、/i/的舌位、基频、起音方式及鼻音特征间无显著关联。辅音声学特征分析仍为腭裂语音研究难点。Duan等<sup>[7]</sup>发现普通话腭裂患儿的塞音/t/和/t<sup>h</sup>/谱矩重心较低,其发音准确度与/i/的准确度显著相关。课题组前期运用频谱动差技术对比腭裂术后与对照组塞擦音频谱差异,发现患者四个塞擦音(/z/、/zh/、/q/、/j/)的M1值显著降低<sup>[8]</sup>。从辅音相关性角度探究其不送气塞擦音异常机制的研究表明,患者组/d/音平均嗓音起始时间(voice onset time, VOT)显著短于对照组,提示该异常或与/d/音嗓音特征相关<sup>[9]</sup>。Duan等<sup>[7]</sup>分析言语治疗前后腭裂患儿塞擦音/j/与/q/的声学特性,发现治疗前患儿/i/的第二共振峰(F2)较低,/j/摩擦段较长,/q/摩擦段较短,/j/与/q/的VOT缩短且频谱重心下移;治疗后/i/的F2显著升高(提示舌位前移),/j/与/q/的VOT延长且频谱重心上移。

腭裂声门塞音是通过声带的突然紧闭和释放来产生一个塞音样声音,以替代本应由口腔器官阻塞气流发出的标准塞音。肖彦<sup>[10]</sup>针对腭裂代偿性发音(如声门塞音、咽擦音等)展开研究。通过构建谱矩分类模型发现,声门塞音M2值显著低于正常塞音,且M3多为正值(正常塞音多为负值),表明其谱能量分布更分散,低频区能量高、高频区能量低。同时,通过提取时域(辅音音长)及1/3频段特征发现<sup>[9]</sup>,咽擦音辅音段音长长于正常塞音(舌位后缩致摩擦时间延长),且低频区谱能量高、高频区谱能量低(前置共振腔更长)。Ren等<sup>[11]</sup>通过电声门图技术,发现声门塞音在预定位电声门图信号和时间

间隔两个指标上有明显改变。

尽管既往有关腭裂语音的声学研究已涵盖时域(如VOT)与频域(如M1)分析,但仍存在以下局限:①时域分析多聚焦送气阶段,缺乏对音节整体发音时长的全局性描述;②频域分析指标零散,缺乏对M1~M4等参数的系统性考察;③韵母研究多集中于单一音素,未对语音格局中的关键元音开展系统性分析;④时域、频域及声母、韵母研究相互割裂,缺乏跨单位的关联性分析;⑤研究多以目标音为分析对象,忽视实际发音音位差异特征的考量。鉴于此,本研究对普通话成年腭裂声门塞音的声学(涵盖时域与频域)及音位特征展开定量分析,旨在构建多模态声门塞音特征模型,并考察患者以声门塞音替代不同目标音时的音位特征差异。该研究结果有望为解析腭裂代偿性发音形成机制及腭裂语音感知处理提供关键依据。

## 1 资料与方法

### 1.1 语音样本的采集

从本单位自建的腭裂语音数据库中,选取以声门塞音为主要特征的成年腭裂语音样本(男、女各1例),包含37个音节,音节结构为普通话三种发音方式的代表音:舌尖摩擦音/s/、舌面不送气塞擦音/j/、舌根塞音/g/,分别与不同韵母组合,均以阴平声调发音(表1),每个音节重复3次,共计222个CV音节(C表示辅音,V表示元音)。同时,从正常语音数据库中选取2例健康志愿者(男、女各1例)的语料样本。所有样本均于南京医科大学附属口腔医院隔声室内,借助搭载Conexant SmartAudio HD声卡的U305F华硕笔记本电脑,通过Praat<sup>®</sup> 6.1.09软件以单声道模式完成数据采集,采样频率设定为44.1 kHz。本研究已获南京医科大学伦理委员会批准(批准号:2023-248),且所有研究对象均已签署知情同意书。

表1 采样音节

Tab.1 Syllable samples

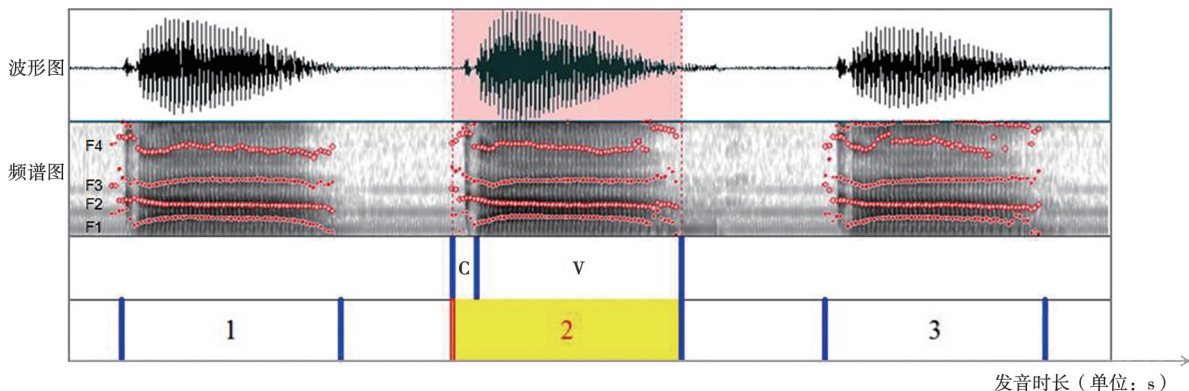
辅音	音节
/g/	ga ge gu gai gao gei guo gou gan gang gen geng guan guang gong
/j/	ji jia jie jiu jin jun jian jiang
/s/	sa si se su sai suo sao sou san sang seng song suan sun

### 1.2 语音数据的标记、提取与分析

采用Praat<sup>®</sup> 6.1.09软件对语音数据进行处理分析。通过波形图与语谱图的协同观察,标注声母起始点(辅音波形起始时刻)、韵母起始点(后接元音

声带振动起始时刻)及韵母终点(后接元音共振峰衰减消失时刻),并以“C”标记声母阶段、“V”标记

韵母阶段(图1)。基于标注结果,进一步提取相关声学参数。



C:音节的辅音阶段;V:音节的元音阶段;1、2、3:依次标注三次重复发音的对应音节段。

图1 Praat® 6.1.09 系统中语音标注示意图

Fig.1 Illustration of the speech annotation in Praat® 6.1.09

### 1.2.1 音节发音时长

提取各音节发音时长,即每次发音中辅音波形起始时刻至后接元音共振峰终止时刻的持续时间(单位:s),计算三次发音时长的平均值作为该音节的发音时长。

### 1.2.2 元音共振峰

采样音节中,声母所接韵母可能为单韵母或复韵母,本研究仅聚焦于与声母直接相邻元音的共振峰特征,而由于第三、第四共振峰即使在同一发音者的相同音节发声中差距仍较大,不具有显著代表性,因此,针对后接元音,选取其声带振动起始时刻后0.02 s时段,提取元音/a/、/i/、/u/的第一共振峰(F1)、第二共振峰(F2),并以F1为纵轴、F2为横轴绘制元音矩阵图。

### 1.2.3 辅音谱矩的提取

提取各音节辅音阶段的谱矩特征,具体步骤如下。基于中间80%发音时段的频谱函数,计算谱矩各参数。

谱重心(centre of gravity, M1):频谱能量的中心频率位置,单位为赫兹(Hz)。M1反映频谱质心的频率分布,对应统计学中的均值概念。

标准差(standard deviation, M2):频谱能量的分散程度,单位为赫兹(Hz)。M2反映谱能量在频域上的离散程度,对应统计学中的标准偏差。

偏度(skewness, M3):频谱能量在高频与低频的分布倾向。M3>0表示能量更多集中在低频区, M3<0表示能量更多集中在高频区;M3=0表示频谱对称分布。M3描述功率谱相对质心频率的对称性。

峰度(kurtosis, M4):频谱能量集中区的陡缓程

度。M4=0表示频谱能量分布符合正态分布;M4>0表示频谱能量分布比正态分布更尖锐;M4<0表示频谱能量分布比正态分布更平缓。M4描述功率谱的尖锐程度。

### 1.3 统计学分析

对数据使用IBM SPSS Statistics 26软件进行分析,其中自变量为组别、性别,因变量则分别为选取的参数,所有的数据在分析前均进行正态性、方差齐性检验。多组间计量资料比较用方差分析,如果方差齐性检验显示方差不齐则选择Welch检验,塔姆黑尼事后检验方法。统计显著性阈值设为 $\alpha=0.05$ (双侧检验),即 $P<0.05$ 为差异显著。相关性分析若满足正态分布则使用Pearson相关分析,若不满足正态分布,则使用Spearman相关分析。

## 2 结果

### 2.1 音节发音时长

患者组与对照组在/g/、/j/、/s/三个声母音节的发音时长上存在显著差异( $P<0.05$ ),性别与组别之间存在交互作用(/g/:  $F=507.96, P<0.001$ ; /j/:  $F=369.58, P<0.001$ ; /s/:  $F=589.73, P<0.001$ )。在塞音/g/发音上,男性患者发音时长显著长于男性对照组( $P<0.001$ ),而女性患者与对照组之间无显著差异( $P>0.05$ );在塞擦音/j/和摩擦音/s/发音上,男性患者发音时长显著长于男性对照组( $P<0.001$ ),女性患者则显著短于女性对照组( $P<0.001$ )(表2、图2)。

### 2.2 元音共振峰

发/a/音时,患者组与对照组的F1值存在显著组别差异( $P<0.05$ ),以及性别与组别的交互作用

表 2 音节发音时长的比较  
Tab.2 Comparison of syllable duration

辅音	男性患者	男性对照	女性患者	女性对照	组别		性别		组别×性别	
					F	P	F	P	F	P
/g/	0.72±0.07	0.42±0.04	0.38±0.02	0.39±0.03	474.94	0.001	736.55	<0.001	507.96	0.001
/j/	0.61±0.04	0.42±0.03	0.39±0.02	0.49±0.05	41.56	0.001	98.46	0.001	369.58	0.001
/s/	0.89±0.06	0.54±0.05	0.40±0.03	0.51±0.09	170.61	0.001	784.93	0.001	589.73	0.001

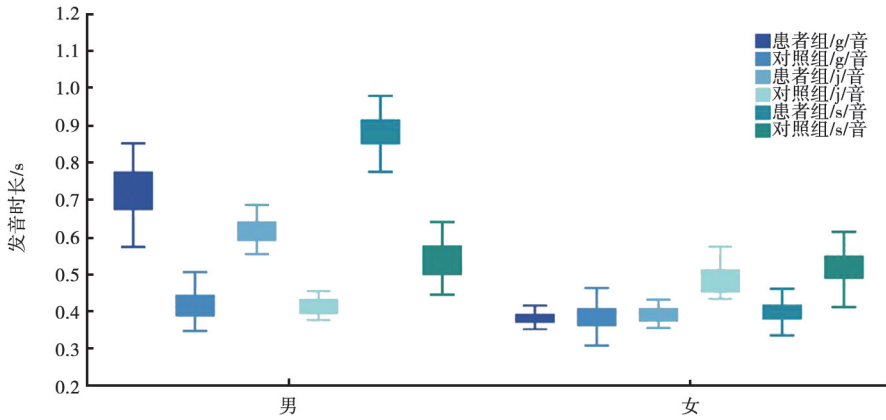


图 2 各组音节的发音时长

Fig.2 Syllable duration

( $F=6.82, P<0.05$ ), 即男性患者 F1 值显著低于男性对照 ( $P<0.001$ ), 而女性患者与女性对照间无显著差异 ( $P>0.05$ ); /a/ 音的 F2 值未发现组别差异 ( $P>0.05$ )。对于 /i/ 音, F1 值无显著组别差异 ( $P>0.05$ ), 但 F2 值存在显著组别差异 ( $P<0.01$ ), 且该差异不依赖于性别 ( $P>0.05$ ), 即患者组 F2 值显著低于对照组。在 /u/ 音上, 患者组与对照组在 F1、F2

值上均未表现出显著差异 ( $P>0.05$ ) (表 3、图 3、图 4)。

以 F2 为横坐标, F1 为纵坐标的坐标系内标记元音 /a/、/i/、/u/ 各组平均值的坐标, 以此为声学元音三角的三个顶点, 三个顶点组成的三角形的面积代表了各元音之间的声学空间, 面积越大, 则元音就越容易区分, 语音清晰度越高。

表 3 元音共振峰的比较

Tab.3 Comparison of vowel formants

元音	共振峰	男性患者	男性对照	女性患者	女性对照	组别		性别		组别×性别	
						F	P	F	P	F	P
/a/	F1	401.98±105.01	543.56±43.10	647.88±163.98	689.56±64.32	22.95	<0.001	104.93	<0.001	6.82	0.01
	F2	1 428.41±219.50	1 439.00±175.62	1 761.59±377.11	1 833.32±222.43	0.75	0.39	58.65	<0.001	0.41	0.52
/i/	F1	293.70±37.33	349.76±71.46	375.71±108.32	337.43±19.53	0.41	0.53	6.26	0.01	11.48	<0.001
	F2	1 713.35±381.55	2 130.14±355.23	1 354.48±505.00	2 560.15±335.61	98.80	<0.001	0.19	0.66	23.36	<0.001
/u/	F1	369.56±81.60	355.49±107.57	423.59±131.77	437.34±86.18	0.00	0.99	11.59	<0.001	0.49	0.49
	F2	1 079.73±322.35	1 160.30±459.29	1 307.43±489.13	1 285.69±476.33	0.12	0.73	4.31	0.04	0.36	0.55

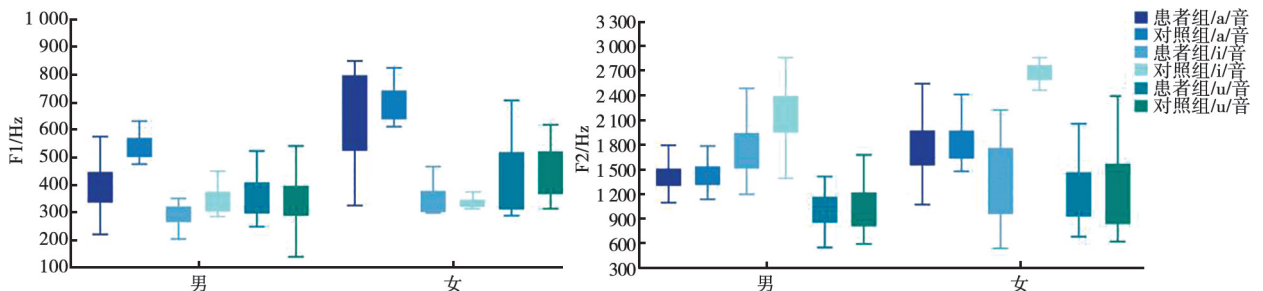


图 3 元音共振峰的比较

Fig.3 Comparison of vowel formants

2.3 辅音的谱矩特征

在 /g/ 音上, 患者组和对照组的 M1、M2、M3、M4

均有显著差异 ( $P<0.05$ ), 而性别均无显著影响 ( $M1: P=0.35; M2: P=0.55; M3: P=0.80; M4: P=$

0.43)。患者组的 M1、M2 值比对照组更低 ( $P < 0.001$ ), 而 M3、M4 值则显著高于对照组 ( $P < 0.05$ ) (表 4、图 5)。

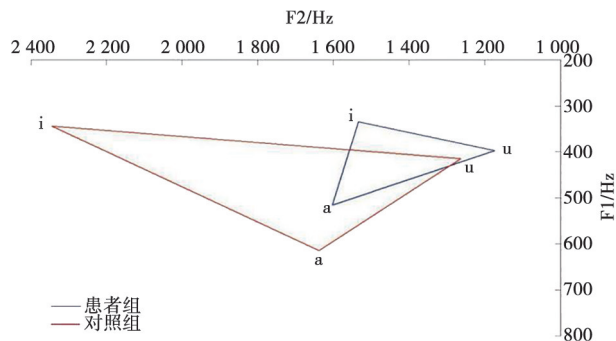


图 4 元音矩阵比较

Fig.4 Comparison of vowel matrices

在 /j/ 音上, 组别对于 M1、M2、M3、M4 均有显著影响 ( $P < 0.05$ ), 性别因素显著影响 M1、M2 ( $P < 0.05$ ), 但对 M3、M4 无影响 (M3:  $P = 0.24$ ; M4:  $P = 0.22$ ), 性别与组别的交互效应仅在 M1、M2 上显著 (M1:  $F = 14.88, P = 0.001$ ; M2:  $F = 78.53, P < 0.05$ )。

表 4 辅音谱矩的比较

Tab.4 Comparison of spectral moments for the consonants

辅音	谱矩特征	男性患者	男性对照	女性患者	女性对照	组别		性别		组别×性别	
						F	P	F	P	F	P
/g/	M1/Hz	492.07±286.42	1 690.93±771.68	608.60±306.32	1 931.87±1 166.17	44.77	<0.001	0.90	0.35	0.11	0.74
		989.00±574.00	2 297.13±676.77	1 107.87±541.38	2 408.40±1 030.20	47.66	<0.001	0.37	0.55	<0.001	0.98
	M3	11.56±6.59	3.65±2.18	10.70±4.63	3.93±3.07	40.92	<0.001	0.06	0.80	0.25	0.62
	M4	257.89±312.36	18.80±23.94	177.74±140.43	27.54±36.41	19.07	<0.001	0.64	0.43	0.99	0.32
/j/	M1/Hz	381.13±78.06	4 401.00±685.64	453.25±166.76	5 861.63±729.77	686.05	<0.001	18.13	<0.001	14.88	<0.001
		798.63±191.34	1 973.25±449.71	867.75±425.25	4 625.87±510.15	286.28	<0.001	87.16	<0.001	78.53	<0.001
	M3	10.68±4.05	0.44±0.31	14.96±8.25	0.10±0.22	59.64	<0.001	1.47	0.24	2.02	0.17
	M4	190.54±163.14	2.53±3.03	381.75±391.51	-1.28±0.23	14.50	<0.001	1.56	0.22	1.69	0.20
/s/	M1/Hz	240.50±25.37	9 011.21±829.49	566.07±241.57	5 302.64±1 905.62	583.37	<0.001	36.59	<0.001	52.04	<0.001
		372.57±80.28	2 669.57±487.06	1 200.86±540.76	4 046.36±506.81	466.91	<0.001	85.85	<0.001	5.31	0.03
	M3	24.64±4.68	-1.91±1.18	9.69±7.30	0.19±0.68	236.07	<0.001	29.98	<0.001	52.82	<0.001
	M4	856.88±400.15	5.59±6.59	180.64±268.18	-0.48±0.97	64.30	<0.001	28.08	<0.001	27.09	<0.001

2.4 音位区别特征

对目标音节中声母为 /g/、/j/ 或 /s/ 替代为声门塞音的音节发音时长进行比较, 结果显示, 患者组与对照组内, 三个辅音的发音时长均存在显著差异 ( $P < 0.001$ )。事后检验表明, 患者组中 /s/ 音的发音时长显著大于 /g/ 音和 /j/ 音 ( $P < 0.001$ ); 而对照组中, 发音时长的关系为 /s/ > /j/ > /g/ ( $P < 0.001$ ) (表 5)。

对目标音 (/g/、/j/、/s/) 下声门塞音的频谱特征进行比较, 结果显示在患者组中, M1、M2 的音素间差异无统计学意义 (M1:  $P = 0.058$ ; M2:  $P = 0.138$ ); 而在 M3、M4 上, 音素间差异显著 (M3:  $P = 0.012$ ; M4:  $P = 0.007$ )。对照组在 M1、M2、M3、M4 四

同一性别中, 患者组的 M1、M2 值均显著低于对照组 ( $P < 0.001$ )。患者组的 M3、M4 值则显著高于对照组 ( $P < 0.01$ ) (表 4、图 5)。

在 /s/ 音上, 组别和性别对 M1、M2、M3、M4 值均存在显著差异 ( $P < 0.05$ ), 且两者交互作用显著 (M1:  $F = 52.04, P < 0.05$ ; M2:  $F = 5.31, P = 0.025$ ; M3:  $F = 52.82, P < 0.05$ ; M4:  $F = 27.09, P < 0.05$ )。同一性别中, 患者组 M1、M2 值显著低于对照组 ( $P < 0.001$ ), 而 M3、M4 值显著高于患者组 ( $P < 0.001$ )。对照组中, 性别对 M3、M4 值无显著影响 ( $P$  均 > 0.05); 患者组中, 男性 M2 值显著低于女性 ( $P < 0.01$ ), 而 M3、M4 值显著高于女性 ( $P < 0.001$ ) (表 4、图 5)。

根据 Spearman 相关性分析, 患者组中, M1 值与音节发音时长呈显著负相关 ( $r = -0.595, P < 0.001$ ); 而对照组 M1 值与音节发音时长, 则呈显著正相关 ( $r = 0.067, P < 0.001$ )。此外, 患者组中 M1 值与 F1 值呈显著正相关 ( $r = 0.243, P = 0.037$ ) (图 6)。

个维度均呈现显著的音素间差异 ( $P < 0.001$ ) (表 5)。

3 讨论

本研究聚焦普通话成年腭裂声门塞音替代现象, 通过整合时域 (如音节发音时长等) 与频域 (如元音共振峰、元音矩阵、频谱能量分布等特征) 的协同分析, 构建了涵盖声韵母的音节声学模型。研究发现, 时长-频谱相关性分析显示, 腭裂患者音节发音时长与 M1 值呈显著负相关, 而对照组音节发音时长则呈显著正相关。同时, 腭裂患者针对不同目标音的声门塞音替代模式呈现显著的时域和频域差

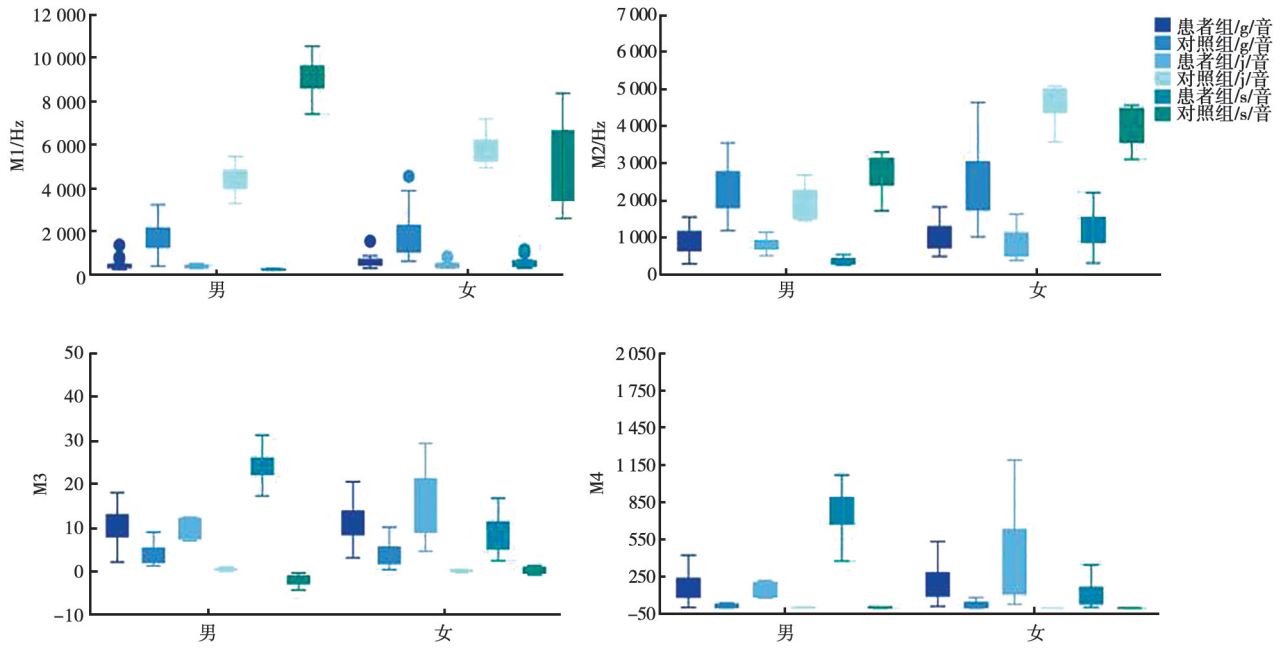


图5 辅音谱矩的比较

Fig.5 Comparison of spectral moments for the consonants

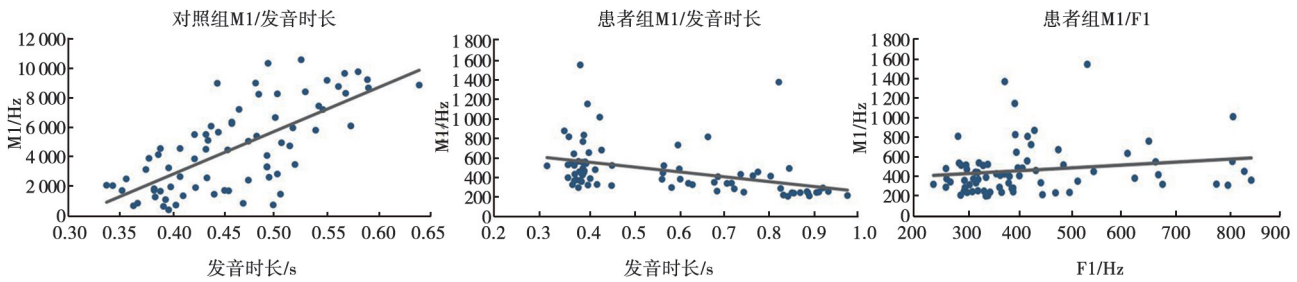


图6 组内参数的相关性分析

Fig.6 Correlation analysis

表5 音素间音节发音时长和辅音谱矩的比较

Tab.5 Inter-phonemic comparison of syllable duration and consonant spectral moments

音位特征		/g/	/j/	/s/	F	P
发音时长/0.01 s	患者	21.30±13.32	20.81±10.75	144.21±125.17	21.77	<0.001
	对照	37.50±15.85	83.25±17.78	164.50±34.15	193.09	<0.001
M1/Hz	患者	550.33±297.34	417.19±131.18	403.29±236.40	2.96	0.06
	对照	1 811.40±979.29	5 131.31±1 018.25	7 156.93±2 376.02	76.28	<0.001
M2/Hz	患者	1 048.43±551.55	833.19±320.55	786.71±567.24	2.03	0.14
	对照	2 352.77±858.29	3 299.56±1 446.45	3 357.96±854.01	8 481.00	<0.001
M3	患者	11.13±5.61	12.82±6.65	17.16±9.70	4.71	0.01
	对照	3.79±2.62	0.27±0.31	-0.86±1.43	46.43	<0.001
M4	患者	217.81±241.42	286.15±306.11	518.76±479.88	5.28	0.01
	对照	23.17±30.60	0.63±2.86	2.56±5.56	10.28	<0.001

异,以实现音位区分。这一发现为解析腭裂声母塞音的音韵特征及形成机制提供信息。

既往关于腭裂语音时域特征的研究多聚焦于嗓音起始时间(VOT)这一参数,研究较为匮乏。有研究报道,普通话腭裂高鼻音组患者/d/的VOT均值显著低于对照组<sup>[9]</sup>。本研究通过音节发音时长量化分析发现,患者组与对照组间存在显著组间差异,且该差异受到性别的影响:男性患者音节发音时长

显著长于对照组,而女性患者则显著短于对照组。这一现象可能与两性在发音气流动力学机制上的固有差异有关<sup>[12-15]</sup>。

元音共振峰反映发音舌位,本研究选/i/、/a/、/u/(分别对应构音腔前上极、前下极及后上极)进行分析。研究发现男性患者/a/音F1降低、/i/音F2降低,提示舌位高且后移。这一结果与构建的代偿发音元音矩阵趋势一致,提示患者倾向使用更小

的构音腔来完成发音。既往研究也提示, 腭咽闭合不全患者元音/i/的 F2、F3 降低, 声学元音三角面积缩小, 语音清晰度下降, 与本研究结果相符<sup>[16-19]</sup>。

频谱矩 (spectral moment analysis, SMA) 被广泛用于量化分析言语障碍患者的声学特征, 特别是辅音发音时的频谱畸变<sup>[20-21]</sup>。辅音频谱分析显示, 腭裂语音的谱矩特征表现为 M1、M2 降低, M3、M4 升高。肖彦等<sup>[10]</sup>基于谱矩参数构建的分类模型证实, 腭裂声门塞音与正常塞音的谱矩差异显著, 具体表现为 M2 值降低、M3 以正值为主, 而正常塞音 M3 多为负值。另有研究指出, 腭裂患儿塞音 /t/ 和 /t<sup>h</sup>/ 的 M1 值亦显著低于正常水平<sup>[7]</sup>。上述结果与本研究结论一致, 表明腭裂患者语音存在低频能量集中、高频衰减的频谱特征, 该现象可能与声门塞音发音部位偏低导致的声源频谱偏移和过高鼻音相关<sup>[22-24]</sup>。

频域时域特征的相关性分析表明, 不同于对照组的弱正相关关系, 腭裂患者音节发音时长与 M1 值呈中等程度负相关, 即发音时长增加时 M1 值降低。这一现象提示, 在声门塞音类发音方式下, 单纯延长发音时长无法有效增强声能积蓄, 反而可能因持续发音导致能量耗散。进一步研究发现, 患者组 M1 与第一共振峰 (F1) 呈弱正相关, 即舌位降低 (F1 升高) 时频谱重心频率 (M1) 同步上升, 推测与张口度增大引起的口腔气流优化相关。研究提示, 声门塞音发音中延长时长对频谱能量无显著改善作用<sup>[10, 23]</sup>, 而适度扩大张口度可能通过气流调节机制对声学特征产生积极影响<sup>[25]</sup>。

当患者以声门塞音广泛替代多种目标音时 (如本研究选取的 /s/、/j/、/g/ 等), 其实际发音是否仍能维持音位层面的差异性, 是本研究的重要问题之一。既往研究表明, 发音时长与频谱矩在摩擦音分类中具有显著区分作用<sup>[26]</sup>, 其中频谱矩在自然会话中的权重更高, 而发音时长在朗读情境下对语音分类的影响更为突出<sup>[11, 27]</sup>。本研究结果显示, 正常对照组在 M1~M4 参数上均呈现显著的音素间差异; 而患者组在 M1、M2 参数上的音位区分能力显著下降, 仅通过维持 M3、M4 参数的差异度实现音位特征区分。同时, 声母发音时长分析表明, 患者基本保留了时域层面的音位区分特征以辅助音位识别。

本研究在样本选取方面存在一定局限性, 所采用的腭裂语音样本与正常语音样本种类相对单一。未来研究可纳入特征更为丰富的语料, 以增强研究结果的普适性与可靠性。在研究内容上, 本研究主要聚焦于腭裂声门塞音的声学与音位特征, 从语音产出维度展开分析, 然而对相关语音的感知特征研

究尚显不足。后续研究应进一步拓展至语音感知层面, 深入探究腭裂声门塞音在听觉感知方面的特性。此外, 未来还可从神经机制角度出发, 开展声门塞音脑中中枢听觉处理的相关研究, 以期对腭裂语音障碍的防治提供新的理论依据与研究思路。

#### 4 总 结

本研究通过分析普通话成年腭裂声门塞音的声学与音位特征, 提示其在音节发音时长、元音共振峰及辅音谱矩等参数上的显著改变, 且存在复杂的时域与频域相关性。此外, 当替代不同目标音时, 声门塞音仅在辅音发音时长和 M3、M4 值上存在显著差异, 进一步揭示了患者音位区别特征的减弱。本研究初步构建了涵盖声韵母协同作用的音节模型, 并对不同目标音的音位差进行声学量化, 为深入解析腭裂语音的音韵特征及声门塞音的发生机制提供了重要参考。

#### [参 考 文 献]

- [1] Boeffard C, Loin J, Clouet R, *et al.* Implementation of a program to strengthen oral hygiene in patient with cleft deformities: A prospective randomized controlled clinical trial[J]. *Trials*, 2025, 26(1): 14.
- [2] 白云, 刘绍伟, 朱孟贤, 等. 腭裂患者异常语音感知中枢神经响应的初步研究[J]. *口腔医学*, 2024, 44(2): 94-99.
- [3] Moura LB, Antoneli MZ, Passaglia RG, *et al.* Speech outcomes after primary palatoplasty and presurgical cleft characteristics: Is there a predictive association? [J]. *J Craniofac Surg*, 2025, 36(3): 862-865.
- [4] Bai Y, Liu SW, Zhu MX, *et al.* Perceptual pattern of cleft-related speech: A task-fMRI study on typical Mandarin-speaking adults [J]. *Brain Sci*, 2023, 13(11): 1506.
- [5] Bai Y, Cao MY, Liu SW, *et al.* Audio-visual crossmodal connectivity in perceiving distorted speech: A comparison between patients with cleft palate and typical listeners [J]. *Neuroscience*, 2025, 580: 270-276.
- [6] 刘倪. 腭裂术后构音障碍患者构音特征的研究[D]. 衡阳: 南华大学, 2023.
- [7] Duan HF, Xie QQ, Zhang ZF. Characteristics of alveolo-palatal affricates produced by Mandarin-speaking children with repaired cleft palate [J]. *Am J Health Behav*, 2023, 47(1): 13-20.
- [8] Jiang CH, Whitehill TL, McPherson B, *et al.* Spectral moment analysis of affricates produced by Mandarin-speaking preadolescents with repaired cleft palate [J]. *Int J Pediatr Otorhinolaryngol*, 2016, 84: 137-142.
- [9] Jiang CH, McPherson B, Ng ML. Voice onset time of alveolar stop /t/ and realization of unaspirated affricates associated with Mandarin-speaking children with repaired cleft palate [J]. *Int J Pediatr Otorhinolaryngol*, 2016, 86: 150-155.
- [10] 肖彦. 腭裂语音中常见代偿性发音错误的声学分析[D]. 北京:

上海交通大学, 2016.

[11] Ren Z, Shang FF, Zheng YF, *et al.* The role of EGG in identifying prevocalic glottal stop[J]. *J Voice*, 2024; S0892199724000201.

[12] Ghasemzadeh H, Hillman RE, Mehta DD. Consistency of the signature of phonotraumatic vocal hyperfunction across different ambulatory voice measures[J]. *J Speech Lang Hear Res*, 2024, 67(7): 1997-2020.

[13] 王澍. 面向腭咽闭合能力个体化预测的发音气流特性研究[D].南京:南京航空航天大学, 2023.

[14] 王亚敏. 汉语普通话声带息肉患者声源和调音的声学研究[D].济南:山东大学, 2024.

[15] Zhu MX, Cao MY, Li S, *et al.* Impact of soft palate extension and elevation on pharyngeal airflow in cleft palate patients: A computational fluid dynamics study [J/OL]. *J Craniofacial Surg*, 2025. [2025-09-23]DOI: 10.1097/SCS.00000000000011478.

[16] 杨增杰. 腭裂语音声学特性分析及临床应用研究[D].北京:北京协和医学院, 2014.

[17] 尹恒, 郭春丽, 石冰, 等. 黏膜下腭裂的腭咽闭合状态及语音表现分析[J]. *华西口腔医学杂志*, 2017, 35(3): 296-300.

[18] 孙涌泉, 周耀华, 张奎洪, 等. 改良腭裂手术方法—腭咽环扎法(附46例报告)[J]. *口腔医学*, 1982, 2(2): 60-62.

[19] 陈欣, 胡勤刚, 李宁毅, 等. 腭裂术后 VPI 患者辅元音节语图和声学特点的研究[J]. *口腔医学研究*, 2011, 27(11): 987-989.

[20] Oliver S, Keyser MMB, Jhingree S, *et al.* Impacts of anterior-posterior jaw disproportions on speech of dentofacial disharmony patients[J]. *Eur J Orthod*, 2023, 45(1): 1-10.

[21] deAndrade LKF, de Cássia Rillo Dutka J, Ferreira GZ, *et al.* Influence of an intensive speech therapy program on the speech of individuals with cleft lip and palate[J]. *Int Arch Otorhinolaryngol*, 2023, 27(1): e3-e9.

[22] 高涛, 马莲, 罗奕, 等. 声门塞音对鼻音计评价腭咽闭合状态的影响[J]. *中华口腔医学杂志*, 2020, 55(12): 958-962.

[23] 陈仁吉. 言语康复指南[M].北京:人民卫生出版社, 2023.

[24] 王颇. 基于声学及运动学特征的病理语音检测与分类研究[D].太原:太原理工大学, 2020.

[25] Hanson HM, Stevens KN. Modeling stop-consonant releases for synthesis[J]. *J Acoust Soc Am*, 2000, 107(5\_Supplement): 2907.

[26] Kharlamov V, Brenner D, Tucker BV. Temporal and spectral characteristics of conversational versus read fricatives in American English[J]. *J Acoust Soc Am*, 2022, 152(4): 2073-2081.

[27] Almurashi W, Al-Tamimi J, Khattab G. Dynamic specification of vowels in hijazi Arabic[J]. *Phonetica*, 2024, 81(2): 185-220.

(收稿日期:2025-05-18)

(本文编辑:杨蓉)

### 关于作者署名的要求

发表于《口腔医学》杂志的论文均应有作者署名。署名者仅限于那些参与选定研究课题和制定研究方案、直接参加全部或主要部分研究工作并做出主要贡献,以及参加论文撰写并能对内容负责,同时对论文具有答辩能力的人员;仅参加部分工作的合作者、按研究计划分工负责具体小项的工作者、某一项测试任务的承担者,以及接受委托进行分析检验和观察的辅助人员等,均不应署名,但署名者可以将他们作为参加工作的人员一一列入文末的“致谢”段。

作者姓名置于题名下方,多位作者署名之间以逗号“,”隔开。

作者工作单位应注明全称(到科室),包括省、自治区、城市名和邮政编码。按作者姓名的排序依次将其中文工作单位著录于文章首页的地脚,不同单位之间用分号“;”隔开。在作者姓名右上角加注不同的阿拉伯数字序号,在地脚依序号分述其工作单位名称。

全部作者姓名的汉语拼音按照中文排序依次列于英文题名和英文摘要中间。根据 GB/T28039-2011 中国人名汉语拼音字母拼写规则及本刊实际,著录要求为姓和名分写,姓在前、名在后,姓名之间用空格分开;姓的所有字母及名的首字母大写,其余均小写;复姓连写,双姓中间加连接号,例如 CAO Xueqin, SHANGGUAN Xiaoyue, CHEN-FANG Yumei 等。

每篇文章均请标明通信作者,并在论文首页脚注通信作者姓名及联系方式(电话、E-mail 等);来自交叉学科的论文可接受来自不同二级学科领域的双通信作者。