

普通话/s/的动态发音过程和声学分析

The articulatory and acoustic analysis of apical fricative /s/ of Standard Chinese

李英浩

Li Yinghao

摘要: 本文使用 EPG 分析单音节和双音节中后字声母/s/的动态发音动作和频谱统计参数。研究表明: (1) 双音节中擦音的成阻的起始方式和时间依据不同的前字韵母而不同。(2) 前字韵母对擦音段动作的影响的程度和时间范围很小, 擦音段主发音器官动作和舌页的耦合动作相当稳定。后字元音对擦音动作的影响主要体现在舌体动作和 sV 交界点附近舌尖动作的变化。(3) 擦音段频谱不受前字韵母的影响, 而与后字圆唇元音密切相关。此外, 在 sV 交界点附近, 擦音频谱与腭位参数的变化存在一定关系。

Abstract: The articulatory and acoustic properties of apical fricative /s/ of Standard Chinese is analyzed electropalatographically and acoustically. The results show that: (1) the approach interval of constriction and gestural timing rely on the preceding rhyme in bisyllable sequences; (2) The carryover effect of the preceding rhyme on the realization of the following apical fricative is fairly limited; The coupling effect between the tongue tip and blade is rather stable across phonetic contexts; However, the anticipatory effect of the following rhyme on the preceding apical fricative is represented in the tongue dorsum gesture and tongue tip movement at the CV juncture; (3) The spectrum of the apical fricative /s/ is not influenced by the preceding rhyme but is highly correlated with the round feature of the following rhyme. Additionally, the spectrum of the apical fricative is correlated with the EPG parameters at the CV juncture.

关键词: 动态电子腭位 齿龈擦音 协同发音 频谱

Key words: electropalatography; apical fricative; coarticulation; spectrum

1. 引言

研究表明/s/的发音动作和频谱受到元音环境的影响^[1-6]。X 光和 MRI 研究发现摩擦音/s/的发音部位受周边元音的影响较小, 但是不参与形成阻碍的舌区易受元音的协同发音影响^[7, 8]。EPG 研究发现/s/的主发音器官的舌腭接触相对稳定, 发音动作限制 (articulatory constraint) 较强^[9, 10], 因此不易受到语音环境的影响, 反而对周边元音产生较强的协同发音影响^[11]。元音对/s/频谱的影响主要表现在 F2 附近^[12], 并且与不同元音环境的/s/的舌腭接触面积正相关^[13]。此外, 圆唇元音降低前腔的共鸣频率^[25, 26]。

汉语普通话的摩擦音/s/的 X 光和静态腭位研究表明/s/的发音动作是舌尖和齿龈前成阻, 舌中线下凹^[14, 15]。已有的普通话 EPG 与国外研究的

结果类似^[16, 17]。/s/的中心频率和下限频率分别为 7 kHz 和 5 kHz 以上^[18]。后接圆唇元音时候, 中心频率和下限频率都降低^[19]。

已有 EPG 研究大多通过分析擦音的静态腭位和声学特征研究擦音发音动作受语音环境的影响, 本文将进一步考察摩擦音/s/作为单音节声母和双音节中后字声母的动态发音过程以及声学特征。

2. 方法

2.1. 语料和录音

语料来自北京大学语言学实验室的汉语普通话动态电子腭位语料库。单音节包括/s/为声母, 韵母首元音为/a, u, ɿ/的所有带调音节, 共 31 个单音节。双音节词前字声母大多为齿龈音, 便于生理信号和声学信号的对齐; 前字韵母包括/i, a, u, ɿ, ʅ/以及韵尾/n, ŋ/, 后字韵母为/a, u, ɿ/。单音节读 2-3 遍, 共 74 个样本; 双音节读一遍, 共 42 个样本。

发音人为女性, 曾经是北京大学广播台的播音员。录音地点在北京大学语言学实验室。发音人录音前佩戴电子假腭进行 20 分钟的适应训练, 之后采集发音人的 EPG 信号 (采样频率 100Hz), 语音信号和 EGG 信号 (采样频率为 22kHz)。

2.2. 腭位和声学分析方法

生理/声学信号的对齐和语音标记在 Matlab 上开发的腭位分析系统上进行。单音节中擦音的起点从语图判断, 元音起点由 EGG 定位。双音节中后字声母/s/往往与前字韵母连接紧密, 由语图和 EGG 共同判断。

假腭前三行为齿龈区, 中间三行为硬腭区, 后两行为软腭区。腭位参数包括接触重心 (COG), 齿龈区面积 (AC)、硬腭区面积 (PC)、软腭区接触面积 (VC)、齿龈区收紧点最窄宽度 (MinW)。COG 定义见^[20], 其他接触面积计算方法是接触电极数和区域电极总数的比率 (%)。MinW 定义为第一行电极中间没有接触的电极数。擦音频谱统计参数包括平均频

率、斜度和峰度，定义参见^[21]，具体算法参考了^[22]。

选取 512 点窗长，256 点步（11ms）长进行分帧后计算频谱统计参数，之后进行时间归一化，选取 20 个时间点。腭位参数每 10ms 计算一次，之后进行时间归一化，选取 20 个时间点。单音节韵母选取 100ms 计算腭位参数，时间归一化后选取 20 点。双音节前字韵母和后字元音的腭位参数经时间归一化后，分别选取 20 个时间点。

3. 结果

3.1. 单音节/s/的动态腭位和声学分析

从图 1 可以看出，擦音段 AC、PC 和 MinW 只在 sV 交界点附近受到后接元音的影响，sa¹、su 和 s₁ 俩俩存在显著差异，因此可以认为 sV 交界点前 /s/ 的发音动作十分稳定，AC 和 MinW 与 /s/ 的主发音器官动作密切相关，而 PC 反映了舌页与舌尖动作的耦合。VC 受到后接元音影响的时间范围接近擦音的声学起点。如不考虑 AC 和 PC，COG 就与 VC 呈现负相关的关系，即 VC 越小，COG 就越大。VC 的变化反映了舌体（dorsum）的运动特性。由于舌体不参与形成阻碍，因此自由度较大，容易受到语音环境的影响。不同元音对 /s/ 的影响程度也不同。/ɪ/ 与 /s/ 的腭位参数基本上没有差别；在 sV 交接点附近，AC、PC 和 COG 的降幅表现为 /a/ > /u/；/u/ 不断提高 /s/ 的软腭接触面积，而 /a/ 则反之。最后，从腭位参数的变化来看，舌尖动作的速度快于舌体动作。

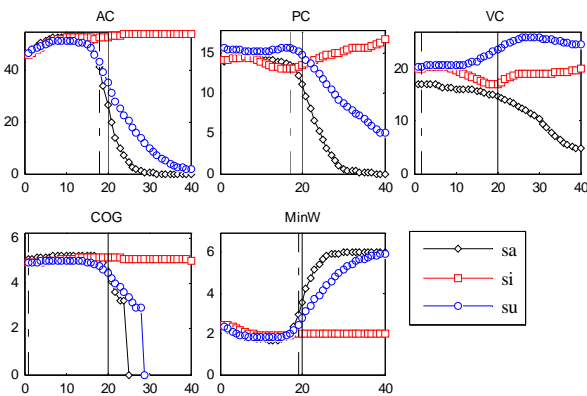


图 1 单音节/s/的腭位参数（图中竖实线为擦音结束点，点杠线为元音影响最远距离， $p < 0.05$ ）

上述结果说明 /s/ 的发音部位在成阻段非常稳定，元音对擦音动作的影响主要体现在两点：第一，擦音段软腭区接触面积的差异导致 COG 的差异；第二，/ɪ/ 对擦音动作影响不大，因此可以认为 s₁ 在整个音节中发音动作基本保持不变。/u/ 对擦音的影响集中在软腭区，这种影响可能在擦

音起点处就存在。在擦音接近结束点的时候，/a/ 的过渡起点较早，变化幅度较大。

频谱统计参数反映擦音在整个频段能量分布的特性。从图 2 可以看出，后接元音对擦音频谱的影响表现在两个方面：第一，圆唇元音降低 /s/ 的平均频率，能量重心接近平均频率（偏度 ≈ 0 ），峰度最低。第二，接近 sV 交界点时的变化因后接元音而不同。s₁ 的平均频率微降，能量重心不断远离中心频率，峰度不断升高。这与 s₁ 在整个音节中发音动作基本不变有关，摩擦产生的湍流往往延伸到元音段²，在元音段起始段形成气化噪音。sa 和 su 在擦音后半段的中心频率和峰度迅速下降，偏度上升。

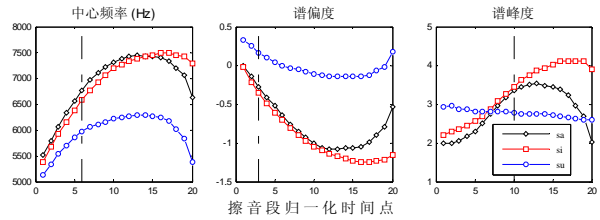


图 2 单音节/s/的频谱统计参数（图中点杠线代表后接元音影响范围的最远点）

3.2. 双音节/s/的动态腭位和声学分析

首先，我们考察 V1sV2 双音节情况。前字韵母为单元音 /i, a, u, ɪ, ʊ/，后字元音为 /i, a, u, ɪ/（图 3）。单因素方差分析结果表明前字韵尾对 /s/ 的首帧腭位参数有显著影响（ $p < 0.0001$ ），后字元音无显著影响；后字元音对 /s/ 的最后一帧腭位参数有显著影响（ $p < 0.0001$ ），前字韵尾无显著影响。这个结果表明后字元音无法跨越 /s/ 对前字韵母产生逆向系统发音影响。

¹ 为行文方便，用 sa 代替“后接/a/的擦音/s/”。

² 此时的噪声源是由于声门不完全关闭产生的。

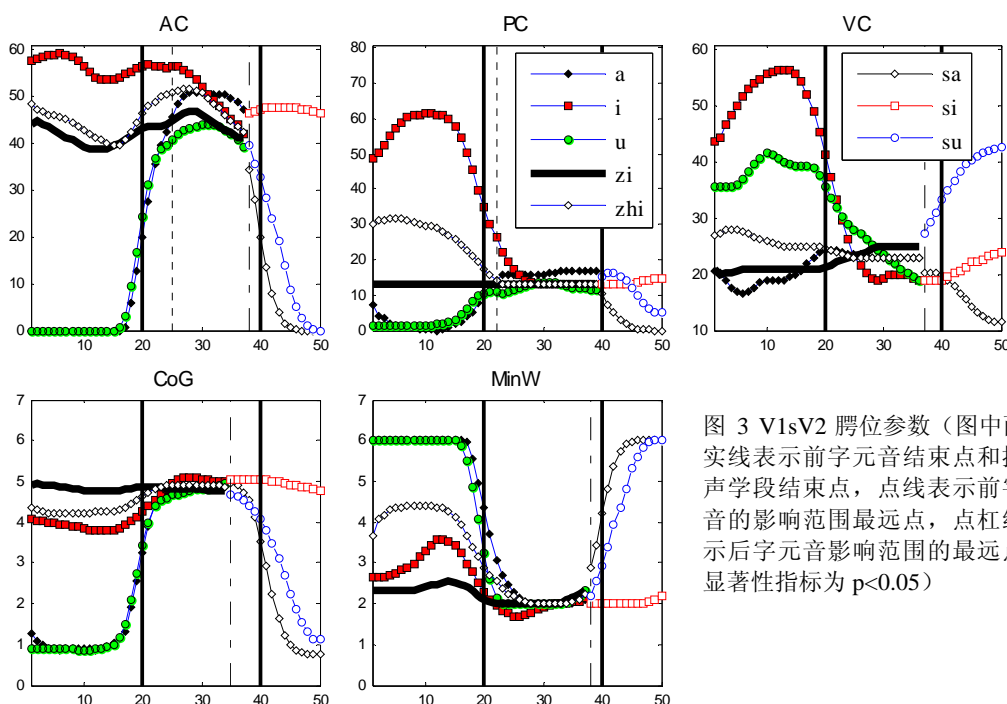


图 3 V1sV2 腭位参数 (图中两黑实线表示前字元音结束点和擦音声学段结束点, 点线表示前字元音的影响范围最远点, 点杠线表示后字元音影响范围的最远点。显著性指标为 $p < 0.05$)

/s/的成阻始于前字元音的尾渡, AC, COG 和 MinW 基本上同步变化, 从前字元音 3/4 时长点 (时间点 15-16) 开始指向/s/的发音目标; 从 PC 和 VC 上看, /s/的动作始于前字元音 1/2 时长点之后 (时间点 13-15)。这个结果说明舌体动作启动时间要早于舌尖动作的启动时间。

擦音段前半部受到前字韵母的影响, 但是不同腭位参数受影响的时间范围不同, 一般不超过擦音段中点。AC 受到的影响最大, 但是 COG 和 MinW 不受前字元音的影响, 说明/s/的发音动作已经基本到位, 只是由于受到前字元音动作惰性的影响, 在 AC 局部区域产生差异。PC 受影响的范围较小, 从第二个时间点开始就保持稳定的接触, 表明舌页与舌尖动作的耦合关系。VC 受前字元音的影响没有显著差异。

擦音除阻点始于擦音段尾渡, AC、VC 和 MinW 迅速转向后接音段的发音动作, COG 也发生相应的变化, PC 基本上不受后接元音的影响。VC 的变化与单音节情况相似, 但是受元音影响的时间范围小于单音节的情况。其变化是否从 V1 向 V2 平滑过渡还需进一步的研究。

从图 4 可以看出, /s/的频谱统计参数受到前字元音影响较小, 在持阻阶段主要受到后字圆唇元音的影响, 中心频率下降, 偏度趋近零, 峰度较低。接近擦音结束点的时候, s₁的频谱参数基本不变, 但是 sa 和 su 的变化同单音节情况一致。

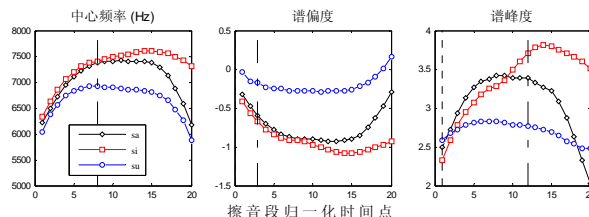


图 4 V1sV2 双音节后字声母/s/的频谱统计参数

另外一种情况是前字带有鼻尾辅音/n, ŋ/。取前字韵母为/an, in, un, aŋ, iŋ, uŋ/, 后字为/sa, s₁, su/的双音节分析 V1nsV2 和 V1gs2V 中/s/的发音过程和频谱参数。分析方法与 V1sV2 一样, 但是加入了鼻音的声学起点。由于鼻音口腔闭合不完全, 鼻音的起点依据语图和鼻音的共振峰而定。

从图 5 可以看出, /s/的成阻过程与鼻音/n/的口腔发音动作部分重合, 鼻音的口腔动作先于/s/的成阻动作, 但是鼻音口腔动作的目标却是指向擦音的动作。首先不同 V1 与鼻音段时长比率基本符合已有的声学研究成果^[24], 不同 V1 后 AC 开始上升的时间点不同; 第二, 从鼻音段尾渡, AC 和 PC 不断下降, 一直延伸到擦音段前半部分。第三, MinW 的变化起点随 V1 的不同而不同, 且在鼻音段不为零。第四, 鼻音结束帧和擦音的起点帧的腭位参数没有显著差异, 表明鼻音的口腔动作的目标就是为了实现擦音的阻碍动作。对比 V1sV2 中擦音段起点帧的腭位参数, 可以发现/n/后/s/的起点帧的 AC 和 PC 接近于 isV2 情况下擦音起点帧的 AC (分别为 55%和 20%左右)。

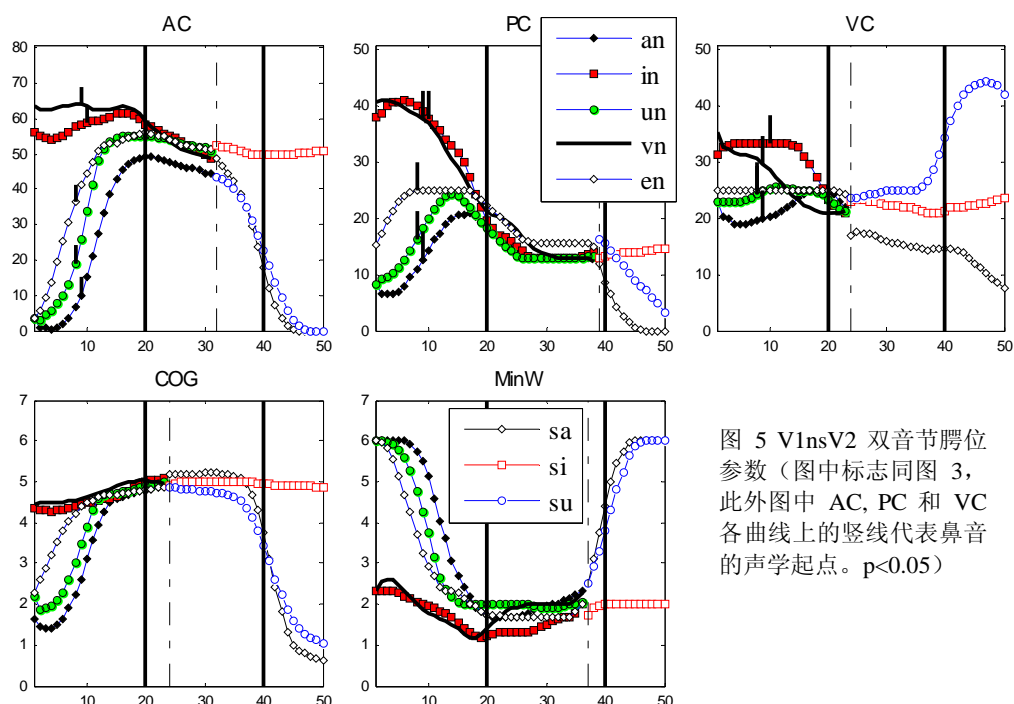


图 5 V1nsV2 双音节腭位参数 (图中标志同图 3, 此外图中 AC, PC 和 VC 各曲线上的竖线代表鼻音的声学起点。p<0.05)

腭位对于解释 V1nsV2 的协同发音相对有限, 这是因为鼻音动作不仅涉及口腔的关闭动作, 软腭还要降低, 从而形成鼻音。但是后接擦音需要形成较高的口腔内压, 因此需要及时关闭腭咽门 (velopharyngeal port)。从上面的分析来看, 鼻音段 AC 和 PC 增大很有可能和口内压要求有关, 接触面积增大导致收紧点后声腔体积的减小。有少量样本在接近擦音起点帧的时候形成完全的口腔阻塞。

擦音受到后接元音影响与 V1sV2 情况不同, AC 受后字元音的影响的时间范围大于 V1sV2 和 sV 情况, 与前者的差异可能是 V1 的影响, 和后者的差异可能来自语速和/或韵律位置的影响。PC 基本上不受影响。VC 变化与单音节情况类似, 表明舌体的运动不受舌尖运动的节制。COG 与 VC 的变化密切相关, VC 越大, COG 则越小。MinW 与 sV 和 V1sV2 情况相同。

从图 6 可以看出, 擦音频谱统计参数与前字韵母无关, 从擦音起点就受到后接元音的影响,

中心频率和谱偏度在 sV2 交界点前分别表现为 $s1 > sa > su$, $su > sa > s1$, 在交界点附近, sa 和 su 的差异消失。si 的谱峰度在整个擦音段都大于 sa 和 su, 后两者则没有区别。

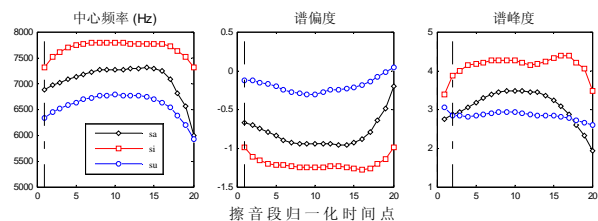


图 6 V1nsV2 双音节后字声母/s/的频谱统计参数

从图 7 可以看出, V1gsV2 情况下, /s/的成阻始于前字韵母中点之后, 表现为 AC、PC、COG 和 MinW 在前字韵母段中同步指向/s/的发音动作, 其在前字韵母段成阻的时间范围大于 V1sV2 情况, 主要原因在于前字韵尾的发音动作与/s/的主发音器官动作并不冲突, 因而产生时域上的动作叠加。

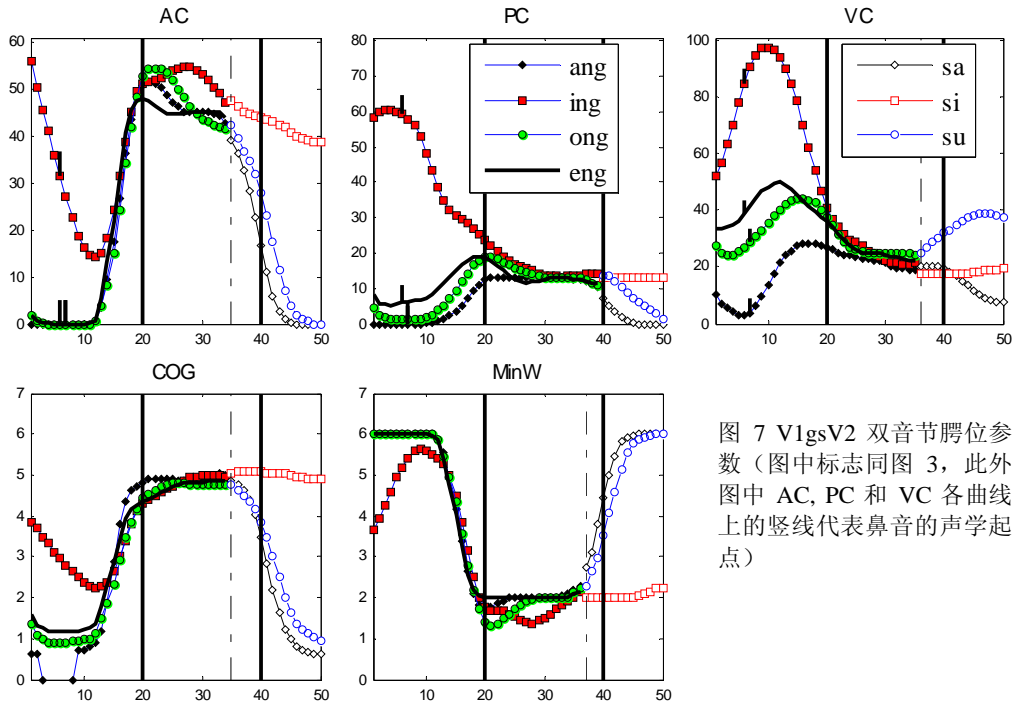


图 7 V1gsV2 双音节腭位参数 (图中标志同图 3, 此外图中 AC, PC 和 VC 各曲线上的竖线代表鼻音的声学起点)

擦音段腭位参数不受前字韵母的影响。后字元音对/s/的影响与 V1nsV2 情况不同。AC、PC、COG 和 MinW 受到后接元音影响的时间范围与单音节情况类似。VC 的变化与 V1sV2 相似, 都是在接近 sV2 边界的时候才表现出显著差异。可能的原因在前字韵尾软腭成阻的动作速度较慢, 向后接元音舌体动作过渡慢于舌尖动作。

从图 8 可以看出, 同其他情况一样, 擦音频谱统计参数只受到后接元音的影响, 而与前字韵母没有关系。中心频率受后接元音影响的时间范围较小与样本容量有关。实际上, 在擦音起点, 中心频率就表现为显著差异, 但是在擦音段中部, 显著差异消失。谱斜率的结果与前面的结果一致。虽然谱峰度受元音影响的时间范围较小, 但是从走向上看, 与前面的结果也是一致的。

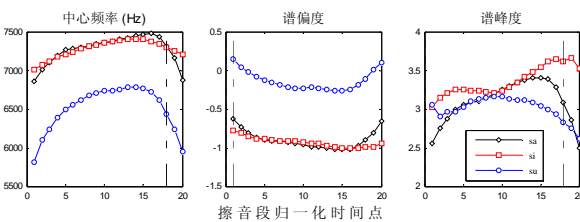


图 8 V1gsV2 双音节后字声母/s/的频谱统计参数

4. 结论

本文讨论了在单音节和双音节中后字声母/s/的动态发音动作和频谱统计参数。双音节中擦音的成阻的起始方式和时间依据不同的前字韵母而不同。起始方式取决于前字韵母的发音部位, 元音韵母条件下, /s/的舌体动作早于舌尖动作, 舌尖

成阻起点较晚; 如果前字韵尾是前鼻音, /s/的发音动作与前鼻尾口腔动作融合, V1n 的动作过渡的相位关系不变, 但是鼻音的口腔动作指向/s/的动作目标; 如果前字韵尾是后鼻音, /s/的起始动作较早, 并且与后鼻尾的软腭阻塞动作产生时域上的叠加。

前字韵母对擦音段动作的影响的程度和时间范围很小, 擦音段主发音器官动作和舌页的耦合动作相当稳定, 舌体动作倾向于平滑过渡。后字元音对擦音动作的影响主要体现在舌体动作和 sV 交界点附近舌尖动作的变化。

擦音段频谱不受前字韵母的影响, 而与后字元音密切相关。此外, 在 sV 交界点附近, 擦音频谱与腭位参数的变化存在一定关系。

参考文献

- [1] Heinz, G.W. On the properties of fricative consonants[J]. *JASA*, 1961, 33(5): 589-596.
- [2] Hoole, et al. A comparative investigation of coarticulation in fricative: Electropalatographic, electromagnetic and acoustic data[J]. *Language and Speech*, 1993. 36: 235-260.
- [3] Hughes, G.W. et al. Spectral properties of fricative consonants[J]. *JASA*, 1956, 28: 303-10.
- [4] Narayanan, S.S. et al. An articulatory study of fricative consonants using magnetic resonance imaging[J]. *JASA* 1995, 98: 1325-47.
- [5] Nartey, J.N.A. On fricative phones and phonemes[R]. *Working Papers in Phonetics*, 1982, WPP 55.
- [6] Subtelny, J.D. et al. Cineradiographic study of sibilants[J]. *Folia Phon*, 1972, 24: 30-50.

- [7] Shadle, C. et al. An MRI study of the effects of vowel context on fricatives[C]. *Proc. IOA 18:9:1*, 1996, 187-194.
- [8] Shadle, C. et al. An MRI study of the effect of vowel context on English fricative[C]. *Acoustics*, 2008, Paris, 5101-6.
- [9] Byrd, D. Articulatory timing in English consonant sequences[R]. *UCLA Working Paper in Phonetics*, 1994, 86.
- [10] Recasens, D. et al. A model of lingual coarticulation based on articulatory constraints[J]. *JASA*, 1997, 102: 544-561.
- [11] Farnetani, E. V-C-V lingual coarticulation and its spatiotemporal domain[C]. In Hardcastle & Marchal (eds.) *Speech Production and Speech Modelling*. 1990. Kluwer Academic Publications: 93-130.
- [12] Soli, S. D. Second formants in fricative: Acoustic consequences of fricative-vowel coarticulation[J]. *JASA*, 1981, 70:976-984.
- [13] Recasens, D., et al. Co-articulatory variability and articulatory-acoustic correlations for consonants[J]. *European Journal of Disorders of Communications*, 1995, 30: 203-212.
- [14] Ladefoged, P. et al. Places of articulation: An investigation of Pekingese fricatives and affricates[J]. *JOP*. 1984, 12: 267-278.
- [15] 周殿福, 吴宗济. 普通话发音图谱[M]. 北京: 商务印书馆, 1963.
- [16] 李俭, 郑玉玲. 汉语普通话发音的变化[J]. 浙江工商大学学报. 2006, 5: 35-40.
- [17] 郑玉玲, 刘佳. 普通话辅音发音部位及约束研究[C]. 第七届中国语音学学术会议论文集, 北京, 2006.
- [18] 吴宗济, 林茂灿. 实验语音学概要[M]. 北京: 高等教育出版社, 1989.
- [19] 许毅. 音节与音联. 载《实验语音学概要》(吴宗济, 林茂灿主编), 北京: 高等教育出版社, 1989.
- [20] Hardcastle, W.J., et al. EPG data reduction methods and their implications for studies of lingual coarticulation[J]. *JOP*, 1991, 19: 251-266.
- [21] Forrest, K. et al. Statistical analysis of word-initial obstruents: Preliminary data[J]. *JASA*, 1988, 84: 115-23.
- [22] Shadle, C.H. et al. Towards the spectral characteristics of fricative consonants[C]. *Proc. ICPHS, Aix-en-Provence*, 1991, v. 3: 42-45.
- [23] Tabain, M. Variability in fricative production and spectra: Implications for the hyper-and hypo- and quantal theories of speech production[J]. *Language and Speech*, 2001, 44: 57-94.
- [24] 林茂灿, 颜景助. 普通话带鼻尾零声母音节中的协同发音[J]. 应用声学, 1992, 1: 12-20.
- [25] Toda, M., Maeda, S., Honda, K. Formant-cavity affiliation in sibilant fricatives[C]. In *Turbulent Sounds in Speech*, Mouton de Gruyter, 2010: 1-33.
- [26] Stevens, K. *Acoustic Phonetics*[M]. MIT Press, 1998.
- [27] 郑玉玲, 刘佳. 普通话 N1C2(C#C)协同发音的声学模式[J]. 南京师范大学文学院学报, 2005, 3: 150-157.