

普通话/a/类韵母的声学实现

——基于四类音位变体的实验语音学分析

刘艺溶

南京大学外国语学院, 江苏 南京

收稿日期: 2026年3月23日; 录用日期: 2026年6月15日; 发布日期: 2026年6月25日

摘要

汉语拼音字母“a”在不同语音环境中呈现系统性的音值差异, 传统描述多停留于经验层面, 缺乏系统的声学量化证据。依据音位变体分布规则, 可将普通话/a/类韵母分为四类: 前a [a] (韵尾i/n)、央a [A] (零韵尾)、后a [ɑ] (韵尾u/ng)、前半低a [ɛ] (韵头i/ü+ 韵尾n)。每类选取20个常用词语, 由一名普通话标准的男性发音人朗读, 使用Praat软件提取元音段中点的第一共振峰(F1)、第二共振峰(F2)及时长, 每词采样3次取均值进行统计分析。结果表明: 四类变体在F1、F2和时长上呈现系统的声学差异, 完全符合音位学预期的分布格局。前a [a]的F1最高, 开口度最大, 且其F2亦显著高于后a [ɑ], 体现舌位前后差异; 前半低a [ɛ]的F1最低, 舌位最高, 同时F2也最高, 呈现明显的前高化趋势; 前a [a]和前半低a [ɛ]因受韵尾影响, 时长显著短于央a [A]和后a [ɑ]。上述差异均受语音环境严格制约, 未构成音位对立, 可解释为/a/的条件同位异音。本研究为普通话/a/的音位变体描述提供了系统的声学证据, 并对语音教学提供了量化参考。

关键词

普通话, /a/类韵母, 音位变体, 共振峰, 时长

Acoustic Realization of Mandarin /a/ Class Finals

—An Experimental Phonetic Analysis Based on Four Types of Allophones

Yirong Liu

School of Foreign Studies, Nanjing University, Nanjing Jiangsu

Received: March 23, 2026; accepted: June 15, 2026; published: June 25, 2026

Abstract

The pinyin letter “a” in Mandarin Chinese exhibits systematic variation in its phonetic realization across phonological environments. However, traditional descriptions often remain impressionistic and lack acoustic-phonetic quantification. Focusing on Mandarin /a/-type finals, this study classifies the relevant realizations into four categories according to their distributional patterns: front a [a] (with codas -i/-n), central a [A] (with zero coda), back a [ɑ] (with codas -u/-ŋ), and front open-mid a [ɛ] (with a medial i/ü plus coda -n). Twenty high-frequency lexical items were selected for each category. A male speaker with standard Mandarin pronunciation read the word list; using Praat, we extracted the first (F1) and second (F2) formant frequencies at the temporal midpoint of each vowel segment, as well as vowel time duration. Each item was recorded three times, and the mean values were submitted to statistical analysis. The results show that the four allophonic categories display systematic acoustic differences in F1, F2 and duration, fully consistent with the expected distributional pattern. Front a [a] exhibits the highest F1, indicating the greatest opening degree of vowels, while its F2 is significantly higher than that of back a [ɑ], reflecting a clear front-back tongue-position contrast. Front open-mid a [ɛ] has the lowest F1 (the highest tongue position) and the highest F2, demonstrating a marked tendency toward fronting and raising. In terms of temporal properties, front a [a] and front open-mid a [ɛ], both influenced by their codas, are significantly shorter than central a [A] and back a [ɑ]. These context-dependent differences do not constitute phonemic contrast; rather, they are best analyzed as conditioned allophones of /a/. This study provides systematic acoustic evidence for the allophonic description of Mandarin /a/ and offers quantitative implications for pronunciation instruction.

Keywords

Mandarin, /a/-Type Finals, Allophone, Formant, Duration

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

汉语拼音方案自 1958 年颁布以来，在语文教学、普通话推广、信息处理等领域发挥了不可替代的作用。它以 26 个拉丁字母记录了普通话的音系，为学习者提供了便捷的标音工具。然而，拼音字母与实际语音之间并非简单的一一对应关系。同一个拼音字母在不同语音环境中往往对应着不同的实际音值，这种现象在音位学中被称为“音位变体” (allophone)。以元音/a/为例，它在“安” [an]、“昂” [ɑŋ]、“烟” [ien]等音节中的发音存在明显差异，但拼音均写作“a”。这种“同形异音”现象在普通话中较为普遍，是音位分析的核心问题之一。

这些差异，传统研究多采用“偏前”“偏后”“开口度更大”等经验性术语来描述，而缺乏声学数据的量化支撑。随着实验语音学的发展，学界开始利用共振峰等声学参数对元音进行精确描写，但针对普通话/a/音位变体的系统声学研究成果不多，对同一发音人内部/a/在不同语境下的精细差异关注不足。

本研究拟采用实验语音学方法，以个案方式对普通话/a/类韵母的典型音位变体进行系统的声学测量与分析，为普通话/a/音位变体的传统描述提供实证支持，展示实验语音学方法在音位研究中的应用价值；同时基于量化的元音共振峰 F1、F2 和时长数据，帮助普通话学习者更好地理解“同一字母不同发音”的

声学原理，为教材编写和中文教学提供直观的参考依据。

2. 相关研究概述

2.1. 音位、音位变体与条件同位异音

音位(phoneme)是特定语言或方言中能够区别意义的最小语音单位，其概念最早由音位学创始人、布拉格学派的特鲁别茨柯伊(Trubetzkoy)等人系统阐述[1]。同一音位在不同语音环境中的具体实现称为音位变体(allophone)。根据分布条件的不同，音位变体可分为自由变体(free variant)和条件变体(conditioned variant)。前者不受语音环境制约，如某些方言中/n/与/l/的自由替换；后者则严格依赖于相邻音段，构成所谓的条件同位异音。

赵元任指出，音位的核心作用是“把须得辨别的声音都辨别出来，把无须辨别的声音故意混为一谈”[2]。汉语普通话的许多音位都存在条件变体。例如，/i/音位在 z、c、s 后表现为舌尖前元音[i̟]，在 zh、ch、sh 后表现为舌尖后元音[i̠]，在其他声母后表现为舌面前元音[i]，这些变体分布互补，属于同一音位。同样，/a/音位在开音节、前鼻音韵尾、后鼻音韵尾等环境中也呈现不同的音值。林焘、王理嘉将/a/的主要变体归纳为[a]、[A]、[ɑ]、[ɛ]、[æ]等类，并指出其分布条件与韵母结构密切相关。这些变体在听感上有明显差异，但不会引起词义变化，是典型的条件同位异音[3]。

2.2. 协同发音与元音共振峰的声学表征

协同发音(coarticulation)是指在自然语流中，相邻音段的发音动作相互重叠、彼此影响的现象[4]。由于发音器官的运动惯性，说话人往往在当前音段尚未结束时已开始为下一个音段做准备，或在进入下一音段时仍保留前一音段的某些特征。这种“前摄”与“滞后”效应导致元音的音质随邻近音段发生系统性偏移。

在实验语音学中，元音的音质通常用共振峰(formant)来描述。第一共振峰(F1)与舌位高度(开口度)呈负相关：F1 越高，舌位越低，开口度越大。第二共振峰(F2)与舌位前后位置呈正相关：F2 越高，舌位越靠前[5]。通过比较同一元音在不同语境下的 F1、F2 值，可以量化协同发音对元音音质的影响。

Fant 的声学理论为考察共振峰与发音动作的关系提供了物理学基础[6]。后续研究表明，前高元音/i/的 F2 通常较高，后高元音/u/的 F2 较低，低元音/a/的 F1 较高。当/a/与前高介音/i/相邻时，/i/的舌位前伸特征会“渗透”到/a/上，导致其 F2 升高，即所谓的前化效应；当与后高介音/u/相邻时，/u/的舌位后缩特征可能使/a/的 F2 降低，但/u/的圆唇特征也可能影响/a/的音质。鼻音韵尾/n/、/ŋ/的出现则通过软腭下降、鼻腔共鸣改变口腔共鸣腔的尺寸，进而影响 F1 和 F2 [6]。

2.3. 普通话/a/类韵母的研究现状

关于普通话/a/的音位变体，传统音韵学和语音学已有大量描述性研究。黄廖本《现代汉语》(增订六版)把“a”的音位变体归纳为[A]、[a]、[ɑ]、[ɛ]四个，但没有展开具体讨论[7]。北大中文系编《现代汉语》则把“a”的音位变体归纳为[A]、[a]、[ɑ]、[ɛ]、[æ]五个，并给出了具体的语音环境[8]。两者分类的区别在于后者认为[ɛ]出现在韵母 ian 中，[æ]出现在韵母 üan 中，而前者则对此不加以区分。林焘、王理嘉也进一步明确了这些变体的分布条件，并绘制了/a/音位的变体格局图[3]。

在实验语音学领域，吴宗济、林茂灿较早采用声学方法测量普通话元音，并给出了各元音的共振峰参考值[5]。孟子厚对普通话单元音的女声共振峰进行了统计测量，但未系统考察不同韵母环境中的变体差异[9]。时秀娟从元音格局角度比较了汉语方言的元音系统，其重点在于方言比较而非音位变体分析[10]。近年来，随着 Praat 等语音分析软件的普及，越来越多的研究者开始关注具体音位的声学实现。例如，王

萍、石锋对北京话元音进行了声学特征的统计分析，对元音空间做了描写[11]。

综上所述，目前对普通话/a/类韵母的研究多是基于少数样例，既缺乏系统的语料设计，对其音位变体的分类也缺少实验语音学数据的支撑，音位学视角的考察也不够具体和全面。本研究力图弥补这些不足，通过对普通话/a/类韵母的四类变体的系统采样和声学测量，为/a/类韵母的音位变体格局提供更全面的数据支持。

3. 研究方法

3.1. 发音人

本研究选取一名普通话水平较高的成年男性作为发音人，其普通话水平为一级乙等。选择单一发音人有助于排除个体差异对比较研究的影响，便于集中考察语音环境对/a/音质的制约作用。发音人口齿清晰，无言语障碍，录音前经过简短练习，熟悉语料内容。

3.2. 语料设计

依据音位变体分布规则，本文将普通话/a/类韵母分为四类，每类设计 20 个词语，共计 80 例。词表设计以双音节词语为主，尽量覆盖不同声母和声调，以减少偶然因素对测量结果的影响。每类变体的分布条件和示例词语如下：

第一类：前 a [a]

分布条件：韵尾为 i 或 n，韵母包括 ai、uai、an、uan。

例词：白菜、海带、怀揣、外快、安全、谈判、算盘、转弯、传唤等。

第二类：央 a [A]

分布条件：零韵尾，韵母包括 a、ia、ua。

例词：大妈、沙发、加价、假牙、乌鸦、西瓜、画家、鲜花等。

第三类：后 a [ɑ]

分布条件：韵尾为 u 或 ng，韵母包括 ao、iao、ang、iang、uang。

例词：高考、跑道、小巧、调料、刚刚、帮忙、刚强、生姜、汪洋、状况等。

第四类：前半低 a [ɛ]

分布条件：韵头为 i 或 ü，韵尾为 n，韵母包括 ian、üan。

例词：边疆、简便、牵连、鲜艳、偏远、圆圈、源泉等。

每类共选取 20 个词语，每个词语在自然语句中朗读一遍(例如：“我说‘白菜’这个词”)，重复录制 3 次，共获得 240 个语音样本。录音时要求发音人保持正常语速和自然语调，避免刻意强调或拉长音节。

3.3. 录音条件

录音在安静的室内环境中进行，背景噪音低于 30 dB。录音设备为智能手机内置麦克风，录音软件为系统自带“录音机”，采样率为 44.1 kHz，单声道，16 位量化精度，保存为 M4A 格式。发音人与麦克风距离约 20 厘米，保持稳定。录音文件借助文件格式转换工具另存为 WAV 格式。

3.4. 数据处理

3.4.1. 语音标注

本文使用 Praat 语音分析软件对采集的 WAV 格式语音文件进行标注[12]。首先，为每个语音文件创

建对应的 TextGrid 标注文件，并设置两个标注层级：第一层为“音节层”(Syllable)，用于标记目标音节的起止边界；第二层为“元音层”(Vowel)，用于在音节内进一步切分出/a/元音的稳定段。

元音段的界定遵循以下原则：起点标在声母除阻之后，宽带语图上出现第一个稳定的、周期性的共振峰脉冲处，即声学能量由弱转强的起始点；对于开音节及无韵尾音节，终点标在振幅显著下降、周期性波形消失前的最后一个稳定周期；对于鼻韵尾音节(如 an、ang)，终点标在第二、三共振峰(F2、F3)明显减弱，低频鼻音横杠开始出现的位置；对于含有介音的二合元音(如 ia、ua)，标注时仅选取靠近韵腹/a/且共振峰走势平稳的后半段作为分析区间，以排除介音对共振峰提取的干扰。

标注完成后，再逐一核对所有边界，确保分段位置准确无误。后续将在每个元音段的中点提取相关的声学参数。

3.4.2. 参数提取

完成元音段边界界定后，利用 Praat 软件的共振峰分析功能提取声学参数。分析参数设置如下：最大共振峰数量(Maximum number of formants)设为 5，窗口长度(Window length)设为 0.025 s (25 ms)，预加重频率(Pre-emphasis form)设为 50 Hz。鉴于发音人为成年男性，声道较长，共振峰频率整体偏低，故将最大共振峰搜索上限(Maximum formant frequency)设定为 5000 Hz，以便优化共振峰轨迹的追踪效果。

在每个元音段的精确中点位置，由软件自动读取该点的第一共振峰(F1)和第二共振峰(F2)值，同时记录元音段的绝对时长(单位精确至毫秒，ms)。

每个目标词语均经过 3 次重复采样，分别提取上述三项参数。为降低单次发音的偶然性误差，将同一词语 3 次测量的 F1、F2 及时长数据取算术平均值，作为该词语的代表值。经此数据处理，四类音位变体各获得 20 个词语的均值数据(即每类 N = 20)，为后续的描述性统计与比较分析奠定基础。

3.4.3. 数据统计

首先，使用 Microsoft Excel 2021 对从 Praat 导出的原始数据进行录入、整理与核查。基于每类变体 20 个词语的均值数据(即每个词语的 F1、F2、时长均值为一个数据点)，分别计算四类变体在 F1、F2 及时长三个维度上的总体均值和标准差，以量化各变体在元音高度、前后位置及时间维度上的集中趋势与离散程度。

本研究为个案探索性研究，样本量主要服务于对音位变体分布格局的精细化描写，而非进行群体层面的统计推断。因此，本文未采用 t 检验或方差分析等推断统计方法检验差异的显著性，而主要采用描述性比较的分析方法：以央 a [A] (零韵尾环境，被视为/a/的典型变体)的声学参数为参照基准，通过比较前 a [a]、后 a [ɑ]、前半低 a [e]与央 a [A]在 F1、F2 及时长上的差值及变化方向，系统描述四类变体的声学分布格局及其与语音环境的对应关系。

4. 实验结果

4.1. 总体描述

根据 20 个词语均值计算，四类/a/音位变体的 F1、F2 及时长的描述性统计结果如表 1 所示。数据表明，四类变体在三个维度上均呈现系统性差异，且类内标准差较小，说明同类词语内部的稳定性较高。

4.2. F1：元音高度

F1 值反映元音开口度的大小，F1 越高，舌位越低，开口度越大。从表 1 可见，前 a [a]的 F1 均值最高(824.2 Hz)，表明其开口度最大，舌位最低。央 a [A]次之，F1 均值为 798.6 Hz，略低于前 a，但仍保持较低的舌位。后 a [ɑ]的 F1 均值为 782.7 Hz，低于前 a 和央 a，表明其开口度略小，舌位略高。而前半低

a [ɛ]的 F1 均值最低(仅 596.7 Hz), 显著低于其他三类, 说明其舌位最高, 开口度最小。

Table 1. Mean and standard deviation of acoustic parameters for the four types of /a/ allophones

表 1. 四类/a/音位变体的声学参数均值与标准差

变体类型	F1 均值(Hz)	F1 标准差	F2 均值(Hz)	F2 标准差	时长均值(ms)	时长标准差
前 a [a]	824.2	51.0	1516.7	95.7	152.2	26.6
央 a [A]	798.6	35.5	1277.6	75.6	241.3	43.1
后 a [ɑ]	782.7	61.9	1187.2	96.4	191.3	46.2
前半低 a [ɛ]	596.7	60.7	1827.4	167.3	134.1	34.2

这一顺序完全符合音位学对四类变体的预期: 前低元音[a]开口度最大, 央低元音[A]和后低元音[ɑ]开口度次之, 前半低元音[ɛ]开口度最小。值得注意的是, 后 a [ɑ]的 F1 略低于央 a [A], 可能反映了韵尾/u/和/ŋ/对元音高度的微弱影响——后高韵尾可能使元音舌位略微抬高。

从标准差来看, 后 a [ɑ](61.9 Hz)和前半低 a [ɛ](60.7 Hz)的类内变异稍大于央 a [A](35.5 Hz)和前 a [a](51.0 Hz), 这可能与后 a [ɑ]和前半低 a [ɛ]的词语中包含不同声母和声调有关, 但总体变异仍在可控范围内。

4.3. F2: 元音前后

F2 值与元音舌位前后密切相关: F2 越高, 舌位越靠前。表 1 显示, 前半低 a [ɛ]的 F2 均值显著最高(1827.4 Hz), 远高于其他三类, 表明其舌位最靠前。前 a [a]的 F2 均值为 1516.7 Hz, 也显著高于央 a [A](1277.6 Hz)和后 a [ɑ](1187.2 Hz), 体现了前韵尾 i/n 对/a/的前移效应。而后 a [ɑ]的 F2 均值最低, 表明其舌位最靠后, 体现韵尾 u/ng 的后移作用。央 a [A]的 F2 介于前后之间, 体现其中央位置。

这一分布清晰地勾勒出 a 类韵母的四类变体在前后维度上的分布差异: 前半低 a [ɛ] > 前 a [a] > 央 a [A] > 后 a [ɑ]。前半低 a [ɛ]的 F2 最高, 甚至贴近典型前元音的范围(通常前元音 F2 在 2000 Hz 以上, 此处 1827.4 Hz 已属较高), 这与韵头 i/ü 的高前特征有关——介音的高位前伸效应使/a/的舌位不仅前移, 还显著抬高, 从而产生[ɛ]的音色。

从标准差来看, 前半低 a [ɛ]的 F2 变异最大(167.3 Hz)。这主要是受韵头(i/ü)的影响: 韵母 ian 中 a 的 F2 (均值约 1942 Hz)普遍高于 üan 中 a 的 F2 (约 1713 Hz); 同时也与该类词语中声母、声调的不同有关。但整体而言, 所有词语的 F2 均远高于其他类别, 表明其分布规律依旧十分稳定。

4.4. 时长

元音时长受多种因素影响, 其中韵尾的存在是重要变量。表 1 显示, 央 a [A]的时长最长(241.3 ms), 因其为零韵尾, 元音段不受后续辅音的时间挤压, 可充分展开。前 a [a]的时长仅为 152.2 ms, 显著短于央 a [A], 这与其后接韵尾 i/n 有关——韵尾发音动作占用了部分音节时长, 导致前接元音段被压缩。后 a [ɑ]的时长为 191.3 ms, 介于前 a [a]与央 a [A]之间, 同样是受到韵尾 u/ng 的压缩影响, 但其压缩程度弱于前韵尾。而前半低 a [ɛ]的时长最短(134.1 ms), 这与其所处的复杂语音环境有关: 既有前高介音(i/ü), 又有鼻韵尾 n, 介音和韵尾对元音段形成双重时间制约。

从标准差来看, 四类变体的时长离散程度存在差异。央 a [A]和后 a [ɑ]的变异相对较大(标准差分别为 46.2 ms 和 43.1 ms), 可能与其内部词语的声调类型多样、声母发音部位差异等因素有关——这些因素可能在一定程度上影响元音的内在时长。前 a [a]的变异最小(26.6 ms), 表明其韵尾压缩效应较为稳定,

不同词语间的时长一致性较高。前半低 a [ɛ] 的变异(34.2 ms)居中, 其时长虽短, 但受介音和韵尾双重制约的效应在不同词语间表现出一定的波动性。

需要指出的是, 由于本研究未对声调、语速等潜在影响因素进行系统控制, 上述关于时长变异来源的解释仍属推测, 有待后续研究进一步验证。

4.5. 小结

综合 F1、F2 和时长三个维度的数据, 普通话/a/音位的四类变体呈现出清晰可辨的声学格局: 前 a [a] F1 最高, F2 较高, 时长中等偏短; 央 a [A] F1 较高, F2 较低, 时长最长; 后 a [ɑ] F1 较低, F2 最低, 时长中等偏长; 前半低 a [ɛ] F1 最低, F2 最高, 时长最短。这些差异均受语音环境制约而致, 且类内一致性较好, 符合“条件同位异音”的特征。

5. 讨论

在前文描述性分析基础上, 下面我们尝试从音位学理论与协同发音理论角度, 对普通话/a/音位的四类变体的声学差异展开讨论, 并对其在普通话语音教学中的应用提出建议。

5.1. /a/的条件同位异音格局

根据音位学理论, 同一音位的不同变体应呈互补分布, 且其语音差异由语音环境决定, 而不会产生词义对立。本研究的声学数据支持将四类变体视为/a/音位的条件同位异音。综合 F1 与 F2 数据来看, /a/在四类变体中的声学实现一方面存在显著差异, 另一方面其类内又有着共同特征。具体分析如下:

央 a [A] 分布于零韵尾环境(a、ia、ua), /a/的舌位处于中央偏低位置, 其 F1 较高; 同时由于无韵头和韵尾的制约, 舌体未产生前后偏移, 因此 F2 偏低, 并且时长也最长(241.3 ms)。

前 a [a] 分布于前韵尾 i/n 环境(ai、uai、an、uan), 其 F1 最高, 表明舌位最低、开口度最大。因前韵尾发音部位靠前(i 为前高元音, n 为舌尖前鼻音), 在协同发音作用下, /a/的舌位被拉向前方, 表现为 F2 显著升高(1516.7 Hz)。同时, 由于前介音与前韵尾的存在, 元音段时长缩短至 152.2 ms。

后 a [ɑ] 分布于后韵尾 u/ng 环境(ao、iao、ang、iang、uang)。由于韵尾的发音部位靠后(u 为后高元音, ŋ 为舌根鼻音), /a/的舌位被拉向后方, 致使 F2 降至最低(1187.2 Hz)。时长也因介音和韵尾压缩至 191.3 ms, 介于央 a 与前 a 之间。这可能与韵尾的发音方式有关——后韵尾对前接元音的时长压缩作用可能略弱于前韵尾。

前半低 a [ɛ] 分布于韵头 i/ü + 韵尾 n 的环境(ian、üan)。这是/a/最特殊的一类变体: 韵头 i/ü 为前高元音, 对后接/a/产生强烈的同化作用, 使/a/的舌位不仅前移, 而且大幅抬高, 形成前半低元音[ɛ]。声学上表现为 F1 最低(596.7 Hz, 舌位最高)、F2 最高(1827.4 Hz, 舌位最前)。韵头 i/ü 与韵尾 n 对元音时长产生双重压缩, 使其成为四类中时长最短的变体(134.1 ms)。

综上所述, 普通话/a/音位的四类变体的声学差异主要由韵母结构(介音和韵尾的有无及其差别)决定, 而其分布环境呈互补状态, 符合“条件同位异音”的定义。从音位学角度看, 可把拼音字母“a”视为同一个音位/a/, 而在不同类韵母中的具体实现, 则是由介音与韵尾(包括无介音、零韵尾)“条件化”产生的变体。拼音方案用单一字母 a 标示这些变体, 在标音上获得了极高的简洁性, 但也不可避免地掩盖了语音层面的精细差异。

5.2. 协同发音机制的声学体现

协同发音(coarticulation)是指在自然语流中, 相邻音段的发音动作在计划与执行过程中相互重叠、彼此渗透的现象[4]。由于发音器官的运动具有惯性且发音过程具有连续性, 说话人往往在当前音段尚未结

束时, 会提前为后续音段启动发音准备(即前摄协同发音/anticipatory coarticulation, 对应“前摄效应”); 或在进入后续音段后, 仍部分保留前一音段的发音特征(即滞后协同发音/carryover coarticulation, 对应“滞后效应”)。本研究中/a/的四类音位变体, 正是这种协同发音机制在声学层面的系统体现。以下分别从韵尾效应、韵头效应及复合效应三个角度加以阐释。

5.2.1. 韵尾的协同发音效应: 前 a [a] 与后 a [ɑ]

前 a [a] 分布于前韵尾 i/n 环境。前介音 i 为前高元音, 韵尾 n 为舌尖前鼻音, 发音部位均靠前。在发 /a/ 的过程中, 舌体需为随后快速到达前韵尾位置而提前调整, 这种“前摄”效应使/a/的舌位在发音阶段即已略有前移。声学上表现为 F2 显著升高: 相较于央 a [A] (1277.6 Hz), 前 a 的 F2 均值达 1516.7 Hz, 升幅接近 240 Hz。与此同时, 前韵尾的存在使元音段时长被压缩至 152.2 ms, 约为央 a (241.3 ms) 的 63%。值得注意的是, 前 a 的 F1 均值(824.2 Hz)为四类中最高, 这可能与前韵尾 i/n 的舌位特征有关——前高韵尾对前接元音的高度影响微弱, 但前移过程中可能伴随口腔开度的略微增大, 使 F1 维持在高位。

后 a [ɑ] 分布于后韵尾 u/ng 环境。后韵尾 u 为后高圆唇元音, ŋ 为舌根鼻音, 发音部位均靠后。受后韵尾的“前摄”效应影响, /a/的舌位在发音阶段即已后移, F2 降至四类最低(1187.2 Hz), 比央 a 还要低约 90 Hz。时长方面, 后 a 受韵尾压缩至 191.3 ms, 压缩程度略弱于前 a。这一差异可能与韵尾的发音方式有关: 前韵尾 i/n 为舌尖动作, 对舌位前移的牵引效应更为直接; 后韵尾 u/ŋ 涉及舌根与软腭运动, 其协同发音的时空范围可能更广, 对前接元音时长的挤压相对缓和。此外, /u/的圆唇特征可能使/a/的唇形略圆, 对共振峰产生微调, 但在本研究中未发现系统性影响。

5.2.2. 韵头的协同发音效应: 央 a [A] 内部的差异

虽然同属零韵尾类别, 但 ia、ua 与单元音 a 的声学表现存在差异, 体现出韵头的协同发音效应。单元音 a 的 F2 偏低(均值约 1290 Hz), 反映舌位处于自然中央位置。ia 中的前介音/i/是前高元音, 舌位前伸且高抬。/a/因受介音/i/的“滞后”效应影响, 在发完/i/后舌位并未完全重置, 而是在向/a/过渡过程中保留舌位前伸的部分特征, 从而使/a/的舌位整体偏前, 导致/a/的 F2 升高至约 1360 Hz。正是这一“前伸”的声学反映, 加上/a/仍保持开口元音的基本高度特征, 因此呈现出“前化”开元音的音质。对 ua 而言, 圆唇后高介音/u/理论上可能拉动后接元音 a 向后移动。但在实际构音中, 为了发出/a/的开口特征, 说话人需要迅速放宽口腔、降低舌位并部分解除圆唇, 这一调整过程与前述“后移”趋势交织, 最终在 F2 (约 1195 Hz)上呈现出较后 a [ɑ] (均值约 1187 Hz)略高而较单元音韵母 a (约 1290 Hz)略低的中间状态, 体现了/u/与/a/之间协同发音的折中效果。这些差异未超出央 a [A]的变异范围, 但清晰地展示了介音对后接元音的协同发音作用。

5.2.3. 介音与韵尾的双重协同效应: 前半低 a [ɛ]

前半低 a [ɛ] 分布于韵头 i/ü + 韵尾 n 的环境, 是协同发音效应最为复杂的变体。韵头 i/ü 本身就是前高元音, 发音时舌位前伸并抬高。在向/a/过渡时, /i/的高位特征并未完全消失, 而是叠加在/a/上, 产生“滞后”效应, 使/a/的舌位被拉高至半低位置; 同时, 韵尾 n 的前摄效应又使舌位保持前位。这种“前高滞后”与“前摄前移”的双重作用, 在声学上表现为 F1 极低(596.7 Hz, 较央 a 降低约 202 Hz)、F2 极高(1827.4 Hz, 较央 a 升高约 550 Hz), 形成独特的前半低元音[ɛ]音色。时长方面, 介音与韵尾形成双重压缩, 使元音段仅 134.1 ms, 为四类中最短, 仅为央 a 时长的一半多。

5.2.4. 鼻韵尾的复合效应: an 和 ang

鼻韵尾 an、ang 中的/a/, 其声学表现体现了鼻音韵尾的复合协同效应。软腭下降、鼻腔参与共鸣改变了口腔共鸣腔的体积与形状, 使/a/的 F1 普遍升高, 表现为更“开”的元音, 在 an 和 ang 中分别约为

844 Hz 和 807 Hz, 均高于央 a 的 798.6 Hz。但 F2 的变化方向并不一致: an 中的/a/因受前鼻音韵尾 n 的前摄效应影响, F2 (约 1460 Hz)显著高于央 a (1277.6 Hz); ang 中的/a/则因后鼻音韵尾 ŋ 的滞后效应, F2 (约 1232 Hz)略低于央 a。这种方向不一的微调表明, 鼻韵尾对舌位前后维度的影响不如口韵尾稳定, 更像是在保证鼻音构成的前提下对口腔构型做出的局部适应, 从而限制了舌位调整的自由度。此外, 鼻韵尾对时长的压缩效应也更为显著: 前 a [a]时长 152 ms, 后 a [ɑ]时长 187 ms, 均显著短于央 a [A], 且前鼻音 n 的压缩强于后鼻音 ŋ。

值得注意的是, 鼻韵尾环境中/a/的 F2 变化虽方向明确, 但类内变异较大(前 a [a] F2 标准差 95.7, 后 a [ɑ]为 96.4), 我们推测可能是由于鼻音韵尾协同效应的复杂性所致: 在保证鼻音构成的前提下, 口腔构型的局部调整导致 F2 产生细微波动, 不如口韵尾环境中的 F2 变化那样稳定。

5.2.5. 欧氏距离: 协同发音的量化指标

下面我们尝试用量化指标来刻画不同语音环境对/a/的协同发音强度。具体而言, 以央元音[A]在 F1-F2 平面上的声学位置作为/a/的“中性参照点”, 计算其他三类变体(前 a、后 a、前半低 a)与此参照点的欧氏距离(即“协同发音偏移量”), 以此作为协同发音影响强度的综合量化指标。计算公式如下:

$$D = [(F1_{\text{variant}} - F1_{\text{baseline}})^2 + (F2_{\text{variant}} - F2_{\text{baseline}})^2]^{1/2}$$

以央 a [A] (F1=798.6 Hz, F2 = 1277.6 Hz)为基准, 计算所得的前 a [a]、后 a [ɑ]、前半低 a [ɛ]在 F1-F2 平面上的欧氏距离分别为约 240.5 Hz、91.8 Hz、585.7 Hz。这一量化数据直观揭示了不同韵母环境的协同发音影响强度: 前半低 a [ɛ]所受的综合影响最大(偏移量约 585.7 Hz), 远超前 a [a](约 240.5 Hz)和后 a [ɑ](约 91.8 Hz), 而后 a [ɑ]受到的协同发音影响最小。这一结果可以用“双重制约效应”来解释: 前半低 a [ɛ]同时受到韵头 i/ü 和韵尾 n 的前后夹击, 韵头的高位前伸效应导致舌位前高化, 韵尾的前摄效应迫使舌位在发音阶段即前移, 二者叠加导致其从/a/的央低位置向左上角大幅漂移; 前 a [a]和后 a [ɑ]在 F1 维度上的变化相对较小(前 a 升高约 26 Hz, 后 a 降低约 16 Hz), 在 F2 维度上前 a 升高约 239 Hz, 后 a 降低约 90 Hz, 这些差异主要由韵尾(i/n vs. u/ng)的前摄效应决定, 尚未受到介音的双重制约, 因此偏移量相对较小。该量化指标将协同发音的效果从定性描述推向了定量表达, 为后续不同语音环境之间协同发音强度的系统比较提供了数据支撑。

综上所述, 协同发音的本质是发音动作的叠加与渗透, 相邻音段的发音特征会向目标音段扩散。普通话/a/音位四类变体的声学差异, 均可从协同发音机制的角度获得合理解释。韵尾的前摄效应主导了前 a [a]与后 a [ɑ]的 F2 分化, 韵头的滞后效应调节了央 a [A]内部的细微差异, 而介音与韵尾的双重协同则塑造了前半低 a [ɛ]独特的声学特征。这些发现表明, 协同发音理论对于语流音变现象具有很强的解释力。

5.3. 与以往研究的对比

将本研究的声学测量结果与前人的描述性研究和实验研究进行对比, 可以进一步验证本文研究数据的可靠性, 并凸显本研究的贡献。

5.3.1. 与传统描述性研究的对比

关于普通话/a/音位的变体分布, 传统语音学教材已有系统的描述性归纳。林焘、王理嘉将低元音音位/a/的条件变体归纳为五类: 前[a]、央[A]、后[ɑ]、前半低不圆唇[ɛ](出现在 ian 中)、前次低偏央[æ](出现在 üan 中) [3]。北大中文系编教材《现代汉语》也采用类似的五分法[8]。黄伯荣、廖序东则在保留前[a]、央[A]和后[ɑ]三个分类的同时, 将[ɛ]、[æ]合并为一类并记作[ɛ] [7]。这一差异体现出不同学者在归纳/a/音位变体时有宽严之别, 具体分歧集中在前半低不圆唇元音[ɛ]与前次低不圆唇元音[æ]的划分上, 也反映出学界对/a/音位内部精细声学差异的不同处理策略。

本研究的声学数据显示, [ɛ]与[æ](即 ian 与 üan 中的/a/)在声学空间中的分布存在重叠。其中, ian 中/a/的 F2 均值(约 1942 Hz)显著高于 üan 中/a/的 F2 (约 1713 Hz), 前者在 F1-F2 平面上更靠近前高元音区, 后者则相对更靠近央元音区。这一差异主要是由韵头 i 与 ü 的声学特性不同所致: /i/为展唇前高元音, /y/为圆唇前高元音, 圆唇特征导致 üan 中韵腹/a/的 F2 整体偏低。尽管如此, 两组变体的 F1 值均稳定落在 500~600 Hz 范围内, 时长特征也高度一致(均约 130~140 ms), 表明它们共享相似的舌位高度和时长模式。从音位经济性角度分析, 二者的分布环境互补, 在感知上也不构成词义对立, 因而采用四分法将其归为同一音位变体是合理且经济的处理方式, 这也是本文采用四分法的主要依据。

除上述合并处理外, 本研究的测量结果与林焘、王理嘉[3]的描述高度一致: 前 a [a]分布于前韵尾环境, F2 显著升高(1516.7 Hz); 央 a [A]分布于零韵尾环境, F2 居中(1277.6 Hz), 时长最长(241.3 ms); 后 a [ɑ]分布于后韵尾环境, F2 最低(1187.2 Hz); 前半低 a [ɛ]分布于 i/ü-与-n 之间, F1 最低(596.7 Hz)、F2 最高(1827.4 Hz), 时长最短(134.1 ms)。这些数据为传统描述提供了系统的声学量化证据。

5.3.2. 与实验语音学研究的对比

在实验语音学领域, 吴宗济对普通话顶点元音的声学特征进行了早期测量[13], 吴宗济、林茂灿在国内最早系统介绍普通话元音的声学测量, 对普通话单元音的生理和声学特征展开了详细分析[5]。本研究中/a/的各类变体的 F1 和 F2 均值都落在普通话元音声学空间的典型范围内, 表明本研究的测量结果是可靠的。此外, 孟子厚对普通话单元音的女声共振峰进行了统计测量, 时秀娟考察了汉语方言的元音系统, 王萍、石锋对北京话的整体元音空间进行了描写[9]-[11]。

与上述实验研究相比, 本文研究在以下几个方面具有一定特色。首先, 在语料设计上, 本文依据音位变体的分布规则, 系统设计了普通话/a/音位的四类变体的语料, 每类变体选取 20 词, 每词采样 3 次, 共获得 240 个有效样本。这一设计既保证了变体类型的全面覆盖, 又通过多次采样降低了单次发音的偶然性误差, 为描述性统计提供了较为可靠的数据基础。其次, 在参数选择上, 本文测量了各个样本在 F1、F2 和时长三个维度的数据, 其中元音时长数据的引入揭示了不同韵尾类型对元音长度的显著影响: 央 a [A]作为零韵尾元音, 时长最长(241.3 ms); 受韵尾压缩的前 a [a] (152.2 ms)、后 a [ɑ] (191.3 ms)、前半低 a [ɛ] (134.1 ms)均明显缩短, 且前韵尾的压缩效应强于后韵尾。这一发现为理解协同发音在时间维度上的表现提供了新的观察视角。再次, 在变量控制上, 本文选取单一男性发音人, 有效排除了性别、年龄、方言背景等因素的干扰, 使测量结果能够更集中地反映语音环境对/a/音质的制约作用, 有助于更清晰地揭示音位变体与语音环境之间的对应关系。本研究在继承传统描写的基础上, 通过系统的语料设计、多维度的参数测量和严格的变量控制, 为普通话/a/音位的变体格局提供了可量化的实证数据, 对已有实验研究形成了有益的补充。

5.4. 对普通话语音教学的启示

普通话教学中, 学习者常因拼音字母“a”在不同词语中读音不同而感到困惑。传统教学方法多依赖于模仿和听辨, 对发音差异的解释多用“开口度大”“靠前”“靠后”等经验性描述, 缺乏直观的声学依据。本研究提供的量化数据可为普通话语音教学提供一定的参考。

首先, 借助元音声学空间图, 可以将普通话/a/音位的四类变体的 F1、F2 均值绘制在元音声学空间图中, 通过直观地展示不同韵母在图中的分布位置, 引导学生观察央 a [A]在声学空间的中心偏下、前 a [a]在偏左下方、后 a [ɑ]在偏右下方、前半低 a [ɛ]则位于左上角的格局。通过观察这些位置关系, 可以帮助学习者有效地建立 F1、F2 与舌位高低、前后相对应的空间概念。

其次, 基于/a/音位不同变体的元音段时长数据, 教学中可选取/a/音位时长“最小对立体”进行对比练习, 让学习者感知不同音节内容的时间结构的差异性。例如, 通过“妈”(央 a [A], 时长较长)与“班”

(前 a [a], 时长较短)的元音时长对比, 让学习者通过听辨和模仿体会韵尾 n 对前接元音的压缩作用。类似地, 通过“帮”(后 a [ɑ], 时长偏短但较前 a [a]略长)与“妈”的对比可展示后鼻音韵尾的压缩效应。

再次, 结合/a/的不同音位变体的实际音值, 指导学习者通过分解练习掌握发音技巧。例如, 对于学习者最难掌握的前半低 a [ɛ](如“烟”“圆”), 可将其发音过程分解为三个阶段来练习: 先发前高元音 i 或 ü, 保持舌位前伸; 接着舌位略降但同时保持前位, 发出接近“耶”的音; 然后舌位抬高, 迅速衔接鼻韵尾 n。这种分解练习有助于学习者掌握前半低 a [ɛ]的发音要领, 克服将 ian、üan 直接读作“衣安”的常见偏误, 使发音更接近自然语流中的实际读音。

本文基于声学测量数据提出上述普通话语音教学建议, 将抽象的发音规则转化为可视化、可量化的教学素材, 为普通话教材编写和课堂教学提供了实证参考。

6. 结语

本文基于一名男性发音人的 240 个语音样本, 采用实验语音学方法对普通话/a/音位的四类变体前 a [a]、央 a [A]、后 a [ɑ]和前半低 a [ɛ]进行了系统的声学测量与分析, 并得出结论: 四类变体在 F1、F2 和时长上呈现系统的声学差异, 符合音位学预期的分布格局; 这些差异均由语音环境(介音、韵尾的有无及类型)决定, 分布互补, 未构成音位对立, 可解释为/a/音位的条件同位异音; 协同发音机制是形成这些音位变体的直接原因, 韵尾的前摄效应主导前 a [a]与后 a [ɑ]的 F2 分化, 韵头的滞后效应调节央 a [A]内部的细微差异, 介音与韵尾的双重协同塑造前半低 a [ɛ]的独特声学特征。本研究为普通话/a/音位变体的传统描述提供了系统的声学证据, 其量化数据可为元音图教学、时长对比训练及发音技巧指导提供实证参考, 对普通话语音教学具有一定的应用价值。

当然, 本文的研究设计也存在一定的局限性。首先, 发音人仅为一男性, 样本代表性有限, 尚不足以支持对普通话整体元音系统的普遍性结论。女性发音人的共振峰通常高于男性, 且可能存在性别差异, 本研究未纳入女声数据(虽有数据采集但未精细校对)。未来可把女性发音人数据纳入测量范围, 完善女声数据的校对, 以便进行性别比较。其次, 本文语料类型相对单一, 未系统控制声母、声调、语速和句法位置等因素, 这些因素也可能对元音共振峰和时长产生影响。后续研究可采用平衡语料设计, 系统考察这些因素对元音声学特征的影响。再次, 本研究为描述性个案, 未严格进行音位变体类间和类内的显著性检验。将来可扩大样本量, 采用线性混合模型等统计方法, 检验各类变体差异的显著性, 并进一步探索音位变体与感知范畴之间的关系, 在宏观音系学与微观实验语音学之间建立更为稳固的联系。

致 谢

本文是在南京大学文学院陈立中教授“现代汉语”课程论文基础上经过多次修改后完成的, 谨此致谢!

参考文献

- [1] [俄] H. C. 特鲁别茨柯依. 音位学原理[M]. 杨衍春, 译. 南宁: 广西师范大学出版社, 2015.
- [2] 赵元任. 语言问题[M]. 北京: 商务印书馆, 1980.
- [3] 林焘, 王理嘉. 语音学教程(增订版) [M]. 北京: 北京大学出版社, 2013.
- [4] Hardcastle, W.J. and Hewlett, N. (1999) Coarticulation: Theory, Data and Techniques. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511486395>
- [5] 吴宗济, 林茂灿. 实验语音学概要[M]. 北京: 高等教育出版社, 1989.
- [6] Fant, G. (1960) Acoustic Theory of Speech Production. Mouton.
- [7] 黄伯荣, 廖序东, 主编. 现代汉语(增订六版) [M]. 北京: 高等教育出版社, 2017.

- [8] 北京大学中文系现代汉语教研室. 现代汉语(增订本) [M]. 北京: 商务印书馆, 2012.
- [9] 孟子厚. 普通话单元音女声共振峰统计特性测量[J]. 声学学报, 2006, 31(3): 199-202.
- [10] 时秀娟. 汉语方言元音格局的系统性表现[J]. 方言, 2006(4): 323-331.
- [11] 王萍, 石锋. 北京话一级元音的统计分析[C]//中国语音学报编委会. 中国语音学报(第 1 辑). 北京: 商务印书馆, 2008: 104-110.
- [12] Boersma, P. and Weenink, D. (2026) PRAAT: Doing Phonetics by Computer. *Glott International*, **5**, 341-347.
- [13] 吴宗济. 普通话元音和辅音的频谱分析及共振峰的测算[J]. 声学学报, 1964(1): 33-40.