

# 人工耳蜗儿童汉语声调的习得 ——植入年龄和听觉经验的影响

余千禧 沈娅南 王丽燕 汤 平

**摘要** 人工耳蜗设备可以帮助中重度神经性耳聋的儿童重拾听力，获得言语交际能力。然而，受设备中的语音信号通道数量和语音编码方式所限，人工耳蜗设备无法有效地传递基频信息，造成了人工耳蜗儿童准确习得声调方面的挑战。尽管如此，之前研究发现早期植入和长期听觉经验对其整体语言发展都有积极影响，即植入越早、听觉经验越长的儿童，其声调发音的准确率就越高。然而，少有研究从声学层面证明二者对人工耳蜗儿童声调习得的影响，且先前研究多关注汉语字调，对轻声习得的研究较少。综上所述，本研究旨在通过声学分析的方法考察人工耳蜗儿童汉语字调和轻声发音模式，并探索耳蜗植入年龄和听觉经验对其声调习得的作用。实验被试包括 96 名拥有不同植入年龄（0—6 岁植入）和听觉经验（0—6 年）的人工耳蜗儿童和 44 名 3 岁的健听儿童（对照组）。实验选取 4 个单音节词和 8 个双音节词作为实验语料，并通过看图说话的方式引导人工耳蜗儿童产出字调和轻声发音。声学分析的结果表明，总体而言，健听儿童能够准确产出不同字调和轻声，且其轻声发音时长也较短。但是，人工耳蜗儿童在准确产出不同字调上存在困难，其轻声发音时长也较长，且其字调和轻声的基频曲线与健听儿童相差较大。尽管如此，植入年龄因素对人工耳蜗儿童声调习得有积极作用：不论听觉经验长短，早期（0—2 岁）植入组的人工耳蜗儿童都能够基本产出不同字调，并产出“短而轻”的轻声，其字调和轻声发音也基本接近健听儿童。听觉经验对其声调习得的作用不显著：不论植入年龄早晚，听觉经验最长（3—6 年）的儿童都无法准确发出字调和轻声，其产出的字调基频曲线整体上较为扁平，轻声基频曲线整体呈现下降趋势。同时，相比于经验较短的组，经验最长组也并没有显著优势。因此，本研究认为，人工耳蜗儿童在汉语字调和轻声的习得上存在困难，但 2 岁植入是人工耳蜗儿童声调习得的“关键期”，可以帮助其习得正常的汉语声调系统（包括字调和轻声）。

**关键词** 人工耳蜗儿童，语言习得，汉语声调，声学分析

## THE ACQUISITION OF MANDARIN TONES BY CHILDREN WITH COCHLEAR IMPLANTS: EFFECTS OF AGE AT IMPLANTATION AND COCHLEAR IMPLANT EXPERIENCE

YU Qianxi, SHEN Yanan, WANG Liyan, TANG Ping

**Abstract** Cochlear implants (CIs) help children with moderate to severe neurological deafness regain their hearing and acquire verbal communication skills. However, due to the limited number of speech signal channels in the device, cochlear implant devices are incapable of effectively conveying fundamental frequency information, which is the key to distinguishing different tones. Therefore, it posed challenges in Mandarin tone acquisition by children with CIs. Nevertheless, previous studies have found that both early implantation and long cochlear implant (CI) experience can positively affect the overall language development of children with CIs, i. e., children with earlier implantation and longer CI experience could have higher accuracy in Mandarin tone perception and production. However, few studies have demonstrated the effect of age at implantation and CI experience on Mandarin tone acquisition by children with CIs through acoustic analysis. Meanwhile, previous studies have focused mostly on Mandarin lexical tone acquisition by children with CIs, with their neutral tone acquisition less explored. Therefore, this study conducted an acoustic investigation of the production of Mandarin lexical and neutral tones by children with CIs. It also explored the effects of age at implantation and CI experience on lexical and neutral tone production by children with CIs. A total of 96 children with CIs varying in ages at implantation (0 – 6 years) and

CI experience (0–6 years) and 44 3-year-old normal hearing (NH) controls were recruited in this study. There were 4 monosyllabic words for lexical tone production and 8 disyllabic words for neutral tone production. The picture-naming task was adopted to guide children to produce lexical and neutral tones. Pitch contours of children's tonal productions were acoustically coded and extracted. The pitch contours of the productions by children with CIs were then analyzed and compared with those of NH children. The results showed that NH children could produce distinct lexical tones and produce neutral tones with a level pitch contour following T3 and a falling pitch contour following other lexical tones. The duration of neutral tone productions produced by NH children was also short. However, children with CIs faced great challenges in producing distinct pitch contours of lexical tones. They also produced neutral tones with longer duration and non-target-like pitch contours. Despite this, children with early implantation (i.e., implanted before the age of 2 years), regardless of the length of CI experience, were able to produce target-like lexical tones and neutral tones, with generally NH-like acoustic features. However, the effect of long CI experience was not significant. Children with the longest CI experience (3–6 years) did not produce target-like lexical or neutral tones, regardless of age at implantation. These children produced lexical tones with flatter pitch contours and neutral tones with falling pitch contours across tonal contexts. Furthermore, they showed no significant advantage in the production of Mandarin tones over other groups with shorter CI experience. Overall, this study revealed challenges in Mandarin lexical and neutral tone acquisition faced by children with CIs. However, implantation before age two is critical to tone acquisition for children with CIs, facilitating them to produce NH-like lexical tones and neutral tones.

**Keywords** Children with cochlear implants, Language acquisition, Mandarin tones, Acoustic analysis

## 1. 引言

人工耳蜗技术的发展能够帮助听障儿童重拾听力，获得感知和产出语言的能力 (Ching 等, 2018)。然而，设备中的语音信号通道数量和语音编码方式有限，人工耳蜗无法有效传递基频信息 (Vandali & van Hoesel, 2012; Pham 等, 2015)。由于汉语利用基频信息区分不同声调，人工耳蜗儿童只能通过有限的基频信息去感知精细的调型变化，并通过感知到的有限信息去学习不同声调的发音，从而造成了声调习得方面的困难 (王硕等, 2011; 毛弈韬等, 2012; 徐立、周宁, 2013)。虽然如此，先前研究也发现，较早植入和较长的听觉经验能帮助这些儿童产出更准确的声调 (Han 等, 2007; Peng 等, 2004)。然而，先前研究多采用人工听辨的方法来判断儿童的声调发音正确与否，少有研究从声学层面分析，比较人工耳蜗儿童和健听儿童的发音 (Xu 等, 2004; Tang 等, 2019a、2021)。此外，汉语轻声也大量出现在日常交际中 (Tang 等, 2019b)，但鲜有研究考察人工耳蜗儿童的轻声习得情况 (Tang 等, 2019a)。因此，本研究旨在用声学分析的方式比较人工耳蜗儿童和健

听儿童产出的汉语字调和轻声，并探索植入年龄和听觉经验对其声调产出的作用。

汉语普通话的声调系统包含四种可以区分语义的字调，具有不同的音高模式，如阴平 (T1)，阳平 (T2)，上声 (T3)，去声 (T4)。除此之外，汉语还有一个轻声，也被称为“第五声”，常常出现在叠词 (如亲属关系词“妈妈”的第二个音节) 和虚词 (如“的”“了”“着”等) 上 (Tang 等, 2019a)。轻声拥有“短而轻”的发音特点，即发音时长较短，只有正常音节时长的 50%—70%；并且，轻声无固定调型，其调型主要由前一字的字调调型决定，如在阴平、阳平、去声后是降调，在上声后是平调或升调 (曹剑芬, 1995; 汤平, 2014)。这表明，准确产出不同字调对轻声的产出至关重要。研究发现，健听儿童大约能在 3 岁前习得字调 (Hua & Dodd, 2000; Li & Thompson, 1977) 和轻声 (Tang 等, 2019b)，并且能在声学层面上准确产出类似成人产出的字调和轻声发音 (Tang 等, 2019b、c)。这意味着，健听儿童可能需要 3 年左右的语言输入才能准确掌握汉语字调和轻声的发音。

然而，准确产出字调对人工耳蜗儿童而言具有挑战性。例如，Han 等 (2007)

考察了14名人工耳蜗儿童的普通话字调产出，采用人工听辨的方式，分别对人工耳蜗儿童和健听儿童的字调发音进行正误判断。结果发现，健听儿童字调发音的正确率为69.4%—96.9%（平均值：78.0%），而人工耳蜗儿童的正确率仅为17.4%—77.9%（平均值：48.4%）。因此，人工耳蜗儿童在字调产出的正确率上与健听儿童还有明显差距。

虽然人工耳蜗儿童在字调习得上存在困难，但先前研究发现，植入年龄和听觉经验是影响人工耳蜗儿童字调习得的重要因素：越早植入、听觉经验越长的儿童，其声调发音的准确率就越高（Peng等, 2004; Han等, 2007）。例如，Peng等（2004）研究了30名人工耳蜗儿童的汉语字调习得，采用了看图说话的方法引导其发声，并通过人工听辨的方式对其发音的准确率进行判断。结果发现，人工耳蜗儿童字调发音正确率与其植入年龄呈负相关，与听觉经验呈正相关。Zhou等（2013）从声学层面考察了植入年龄、听觉经验、家庭收入、教育方式等因素对人工耳蜗儿童字调感知和产出的作用，结果发现只有植入年龄与听觉经验对人工耳蜗儿童的声调感知和产出存在影响。

然而，先前有关植入年龄和听觉经验对人工耳蜗儿童声调产出作用的研究主要通过人工听辨来判断儿童声调发音的准确性，鲜有研究从声学层面上探索其发音能否达到健听儿童的发音水平。此外，虽然已有许多研究考察了健听儿童的轻声习得情况（Li & Thompson, 1977; Hua & Dodd, 2000; Hua, 2002; Tang等, 2019a），但是，鲜有研究探究人工耳蜗儿童的轻声习得情况。由于轻声在日常交流中大量存在，准确习得轻声对人工耳蜗儿童而言同样非常重要。

目前，只有Tang等（2019a）采用了声学分析的方法探索了植入年龄和听觉经验对人工耳蜗儿童声调习得的影响，包括字调和轻声，研究发现，早期植入影响重大，2岁前植入的儿童字调和轻声的发音都接近于健听儿童。然而，由于其研究样

本量中只有7名2岁前植入的儿童，其研究结果的可靠性还有待进一步验证。

因此，本研究延续了Tang等（2019a）的实验，在扩大人工耳蜗儿童样本量的基础上探索以下问题：

（1）人工耳蜗儿童能否准确产出汉语四种字调的音高模式？

（2）人工耳蜗儿童能否掌握轻声“短而轻”的发音模式？即时长较短，并根据前音节的声调进行准确的变调（上声后为平调/升调；阴平/阳平/去声后为降调）。

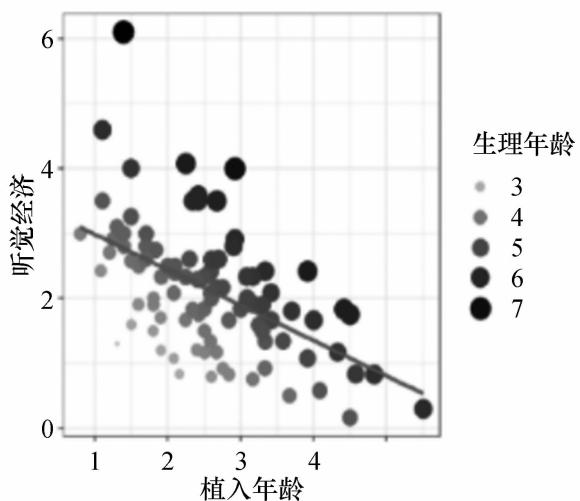
（3）植入年龄和听觉经验对人工耳蜗儿童字调和轻声习得的影响模式是怎样的？

基于先前的研究结论（如Peng等, 2004; Han等, 2007; Tang等, 2019a），我们预测，人工耳蜗儿童在准确产出四种不同的字调上可能面临困难，也无法准确产出“短而轻”的轻声。同时，我们也预测早期植入和长期听觉经验可以帮助其更好地习得声调，即植入年龄越早，听觉经验越长，人工耳蜗儿童就可以更准确地产生字调和轻声的声学模式，并产出与健听儿童相类似的声调。

## 2. 方法

### 2.1 被试

本研究共招募140名被试，其中包括96名已植入人工耳蜗的语前聋儿童（CI儿童其中，3—4岁：22人，平均年龄：3.56岁，年龄标准差：0.34岁；4—5岁：41人，平均年龄：4.51岁，年龄标准差：0.28岁；5—6岁：33人，平均年龄：5.73岁，年龄标准差：0.52岁）和44名3岁健听儿童（NH儿童，平均年龄：3.67岁，年龄标准差：0.25岁）。所有被试日常用语皆为普通话。CI儿童都来自北京和北京周边一些北方方言城市中的言语康复中心。这些儿童的人工耳蜗植入年龄介于0—6岁，听觉经验介于0—6年。这些CI儿童除听力障碍外，无任何智力问题。NH儿童都来自北京的一所幼儿园，均无听力和智力发育问题。



**图1** 本研究中CI儿童的年龄信息，  
包括植入年龄（单位：岁），  
听觉经验（单位：年）和  
生理年龄（单位：岁）

我们在声学上比较NH儿童和CI儿童（植入年龄和听觉经验不同）的声调产出。因为植入年龄和听觉经验有显著相关性（皮尔森相关系数 $r = -0.53$ ,  $p < 0.01$ ），即植入早的儿童听觉经验也通常较长，植入晚的儿童听觉经验也通常较短（见图1），所以，本文根据植入年龄和听觉经验对CI儿童进行分组，再考察植入年龄对听觉经验相同的组的影响，以及听觉经验对植入年龄相同的组的影响。

在保证各组人数相对均衡，且每组都有一定人数的被试（不少于10人）的基础上，我们根据植入年龄将CI儿童分为3组：植入年龄0—2岁（0岁<植入年龄<2岁，27人；其中只有1名儿童为1岁前植入，其余26名儿童均为1—2岁植入）；植入年龄2—3岁（2岁≤植入年龄<3岁，39人）；植入年龄3—6岁（3岁≤植入年龄<6岁，30人）。根据听觉经验，CI儿童也被分为3组：听觉经验0—2年（0年<听觉经验<2年，47人）；听觉经验2—3年（2年≤听觉经验<3年，34人）；听觉经验3—6年（3年≤听觉经验<7年，15人）。

## 2.2 实验材料

### 2.2.1 字调材料

在字调发音实验中，我们选用了儿童

日常生活中熟悉的单音节词来引导儿童发出四种字调。字调发音实验的实验语料为以下四个涵盖四种汉语字调的单音节词：“书”“球”“鼓”“画”。根据CHILDES (Child Language Data Exchange System, MacWhinney, 2000) 数据库中的Chang语料库 (Chang, 1998) 和Tong语料库 (Deng & Yip, 2018)，所有单音节词都属于3岁以下NH儿童日常语言输入中的常见单音节词。

### 2.2.2 轻声材料

在轻声发音实验中，我们选用了两类常见的双音节轻声词作为语料，包括叠词（亲属关系词，如“哥哥”）和所有格词（以“的”字结尾，如“X的”）。同时，每类轻声词包括四个不同的双音节词，涵盖四种不同的声调语境 (TXT0: T1T0, T2T0, T3T0, T4T0；如“哥哥”“爷爷”“奶奶”“妹妹”），以考察CI儿童是否掌握了不同声调语境中轻声发音的特点。

## 2.3 实验流程

每位被试都在安静房间内单独接受测试。我们采用看图说话的方式引导被试产出声调发音。被试全程佩戴AKG C520头戴麦克风，麦克风放置于被试嘴前约3厘米处，与Marantz PMD 661MKII录音机相连。被试的所有发音都由此头戴麦克风录制，采样率为44.1kHz，采样精度为16bit。

### 2.3.1 字调发音实验

实验采用图片命名的方式引导儿童发出字调，包括两个阶段：练习阶段和正式实验阶段，两个阶段的流程相同，而练习阶段采集到的数据不进行进一步的分析。在引导儿童的每个发音时，一名母语为普通话的实验操作员在电脑屏幕上展示一张图片，并让被试说出图片内容的名称，如“猫”。如果被试没有说出名称或说成了另一个名称（如，被试将“猫”说成了“猫咪”），实验操作员将予以纠正，并引导被试再说一次图片名称。只有被试正确说出目标词后，才会展示下一张图片。对于每一个目标词，被试只产出一个发音。本实验共获取了568个字调发音，其中16

个T3发音出现明显嘎裂，已被剔除，因此只有552个发音参与最终的数据分析（NH儿童发音：168个，CI儿童发音：384个）。

### 2.3.2 轻声发音实验

实验包括叠词发声和所有格词发声两项任务。在叠词发声任务中，我们在电脑屏幕上依次呈现4张图片。在每张图片中，两位家庭成员的卡通形象图并排出现，如一位哥哥和一位妹妹。为了引导被试说出目标词“哥哥”，实验操作员向被试介绍图片并提问：“这个男孩叫这个女孩妹妹，那么这个女孩叫这个男孩什么？”一旦被试说出目标词“哥哥”，实验操作员就会呈现下一张图片继续引导被试发出其他词。

在所有格词发声任务中，电脑屏幕上也会依次呈现4张图片。每张图片上并排出现两只动物的卡通形象，如“猪”和“牛”。为了引导被试发出目标双音节词“猪的”和“牛的”，实验操作员先分别介绍这头猪和这头牛，然后再播放其中一个动物（如猪）活动的动画（如旋转尾巴）。在播放动画时，实验操作员询问被试“这是谁的尾巴？”当被试说出目标词“猪的”后，实验操作员继续播放另一个动物（如牛）活动的动画（如旋转尾巴），然后问被试同样的问题，引导被试说出目的词“牛的”。

本实验共获取了976个轻声词发音，其中有53个发音因音质较差，在进一步分析前被剔除。因此，共有923个轻声词发音参与最终分析（健听儿童：393个，人工耳蜗儿童：530个）。

## 2.4 数据收集与分析

### 2.4.1 测量与编码

本研究使用Praat软件（Boersma & Weenink, 2018）对被试产出的字调和轻声发音进行声学标注和处理，并对错误提取到的基频点进行手工修正。我们提取了所有字调发音的音高信息和轻声发音的音高和时长（调长）信息。为了提取音高信息，我们从目标音节（包含字调的单音节和包含轻声的双音节中第二个音节）的韵

母部分等距提取10个基频点。本研究通过公式（1）将原始音高值（Hz）转为半音值（St），并通过公式（2）对音高数据进行归一化处理。对于轻声时长数据，我们用公式（3）对每个轻声音节的时长也进行了归一化处理。归一化轻声时长小于1，则表示轻声时长相较于字调时长更短。

$$\text{音高 (St)} = 12 \times \log_2 \left( \frac{\text{音高 (Hz)}}{50} \right) \quad (1)$$

$$\text{归一化音高} = \left( \frac{\text{音高 (St)} - \text{平均音高 (St)}}{\text{音高标准差}} \right) \quad (2)$$

$$\text{归一化轻声时长比} = \left( \frac{\text{轻声时长 (ms)}}{\text{轻声前字调时长 (ms)}} \right) \quad (3)$$

### 2.4.2 数据分析

先前研究发现，可以通过基频曲线的高度和轮廓形状的声学参数来有效表征汉语声调，而基频曲线的“高度”（基频均值）、“斜率”和“曲度”就是量化字调基频曲线的重要参数（Gauthier等, 2007；Tupper等, 2020）。Gauthier等（2007）的研究发现汉语声调曲线的“斜率”和“曲度”不仅是区分不同声调的重要声学线索，也是人感知声调的最重要的声学关联物。Tupper等（2020）考察了22种声学线索对于区分汉语声调的影响，发现“高度”“斜率”和“曲度”是捕捉声调间差异、区分汉语字调最重要的一组线索。Peng（2006）的研究也强调了综合考虑“高度”和“斜率”对于区分汉语字调的作用。因此，在本研究中，我们把不同声调间的“高度”“斜率”和“曲度”是否有显著差异都纳入考量，从而来判断儿童产出的声调是否在声学上可以区分。

在分析音高信息时，我们采用了“生长曲线分析”（Growth curve analysis, Mirman, 2014），对儿童声调发音的归一化基频曲线进行二阶正交多项式拟合。对于每一个声调发音，该函数生成两个基频曲线参数：斜率（由一次项系数反映，系数为正表示基频曲线上升，即升调型；系数为负则表示基频曲线下降，即降调型；

系数接近于0则表示平调型) 和曲度(由二次项的系数反映, 系数为正表示基频曲线呈凸型, 系数为负则表示基频曲线呈凹型, 系数接近0则表示基频曲线接近平调型)(Mirman, 2014)。此外, 对于每一个字调发音, 我们都计算了其基频均值作为“高度”的数据。

本研究使用 R (R Core Team, 2016) 进行数据分析。本研究使用“lme4”包中的 lmer 函数 (Bates 等, 2014), 建立了线性混合效应模型, 分别对音高和时长参数进行组间比较。同时, 我们使用“lmerTest”包中的方差分析 (anova) 函数对固定因素及其交互效应进行 F 检验, 采用 Satterthwaite 近似法测得自由度, 以此估算  $p$  值 (Kuznetsova 等, 2015)。当观察到显著主效应或显著交互效应时, 我们使用“emmeans”包中的 lsmeans 函数对主效应或交互效应进行 Tukey-HSD 事后检验分析。

### 3. 结果

#### 3.1 字调实验结果

##### 3.1.1 植入年龄的效应

为了在控制听觉经验的前提下考察植入年龄对字调发音的影响, 我们按照听觉经验将 CI 儿童分为 3 组: 听觉经验 0—2 年; 听觉经验 2—3 年; 听觉经验 3—6 年, 并使用混合效应模型将每一个 CI 儿童组的声调发音分别与 NH 儿童相比较(基于 3 个基频曲线参数: 高度、斜率和

曲度)。每个模型中有两个固定因素: “分组”[4 个水平: NH 儿童, CI 儿童(植入年龄 0—2 岁), CI 儿童(植入年龄 2—3 岁), CI 儿童(植入年龄 3—6 岁)] 和“声调”(4 个水平: T1, T2, T3, T4), 以及一个协变量“生理年龄”和一个随机因素“被试”。其中, 由于 CI 儿童人数不平衡, 听觉经验 3—6 年的 CI 儿童在“分组”中只有 3 个水平(NH 儿童, CI 儿童 [植入年龄 0—2 岁], CI 儿童 [植入年龄 2—3 岁])。

听觉经验 0—2 年组: 图 2 显示了 NH 儿童和听觉经验 0—2 年的 CI 儿童(植入年龄不同)的归一化字调基频曲线。听觉经验 0—2 年的 CI 儿童的结果显示, “分组  $\times$  声调”在高度  $F(9, 4768) = 38.05, p < 0.01$ , 斜率,  $F(9, 4597) = 10.83, p < 0.01$  和曲度  $F(9, 4599) = 7.02, p < 0.01$  上有显著交互效应。

对“分组  $\times$  声调”交互效应的 Tukey-HSD 事后检验分析结果显示, NH 儿童产出的字调在声学上可以区分。听觉经验 0—2 年的 CI 儿童中, 植入年龄 0—2 岁组产出的各个字调在声学上可以区分, 且各个字调的高度、斜率和曲度与 NH 儿童相似。CI 儿童(植入年龄 2—3 岁)组产出的各个字调在声学上可以区分, 但该组产出的 T3 和 T4 都与 NH 儿童有显著差异。CI 儿童(植入年龄 3—6 岁)组无法在声学上区分 T2 和 T3 这两个字调, 且其每个字调的发音与 NH 儿童有显著差异(见附录)。

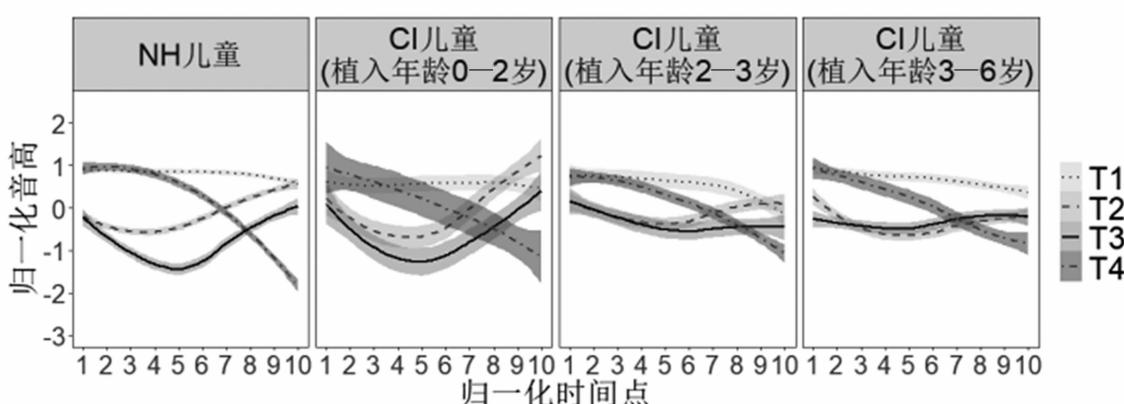


图 2 NH 儿童和听觉经验 0—2 年的 CI 儿童归一化字调基频曲线

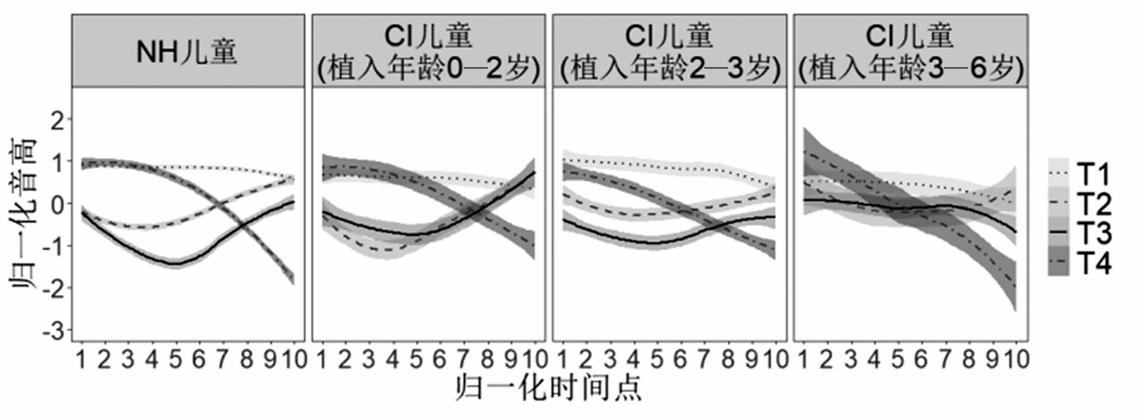


图3 NH 儿童和听觉经验 2—3 年的 CI 儿童归一化字调基频曲线

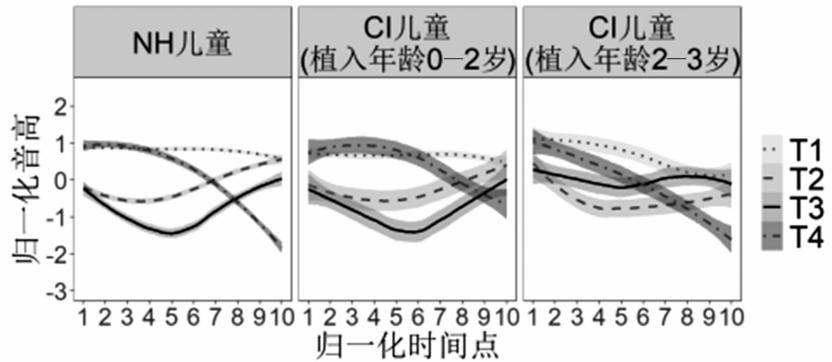


图4 NH 儿童和听觉经验 3—6 年的 CI 儿童归一化字调基频曲线

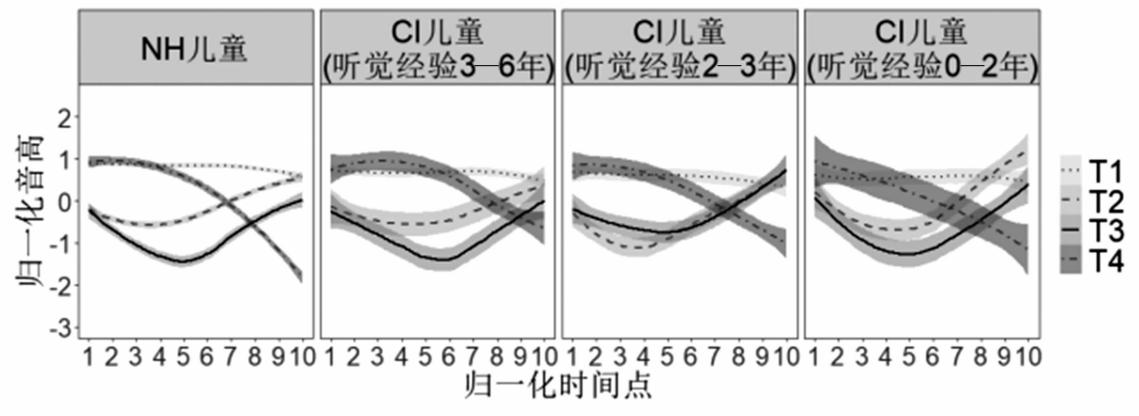


图5 NH 儿童和植人年龄 0—2 岁的 CI 儿童归一化字调基频曲线

听觉经验 2—3 年组：图 3 显示了 NH 儿童和听觉经验 2—3 年的 CI 儿童的归一化字调基频曲线。听觉经验 2—3 年的 CI 儿童的结果显示，“分组 × 声调”在高度  $F(9, 3483) = 77.94, p < 0.01$ , 斜率  $F(9, 3341) = 9.64, p < 0.01$  和曲度  $F(9, 3341) = 9.71, p < 0.01$  上有显著交

互效应。对“分组 × 声调”交互效应的 Tukey-HSD 事后检验分析结果显示，NH 儿童可以产出不同的字调，CI 儿童（植入年龄 0—2 岁）产出的各个字调在声学上都可以区分，但该组产出的 T3 和 T4 与 NH 儿童有显著差异。CI 儿童（植入年龄 2—3 岁）产出的各个字调在声学上都可以

区分, 但该组产出的 T1, T2, T3, T4 都与 NH 儿童有显著差异。CI 儿童(植入年龄3—6岁)产出的 T1 和 T2, T2 和 T3 在声学上无法区分, 且该组产出的 T1, T2 和 T3 都与 NH 儿童有显著差异(见附录)。

听觉经验3—6年组: 图4显示了NH儿童和听觉经验3—6年的CI儿童的归一化字调基频曲线。听觉经验3—6年的CI儿童结果显示, “分组×声调”在高度  $F(6, 2502) = 60.99, p < 0.01$ , 斜率  $F(6, 2401) = 8.87, p < 0.01$  和曲度  $F(6, 2401) = 7.26, p < 0.01$  上有显著交互效应。对“分组×声调”交互效应的Tukey-HSD事后检验分析结果显示, NH儿童可以产出不同的字调。CI儿童(植入年龄0—2岁)产出的各个字调在声学上都可以区分, 且所有字调的斜率, 曲度都与NH儿童相似, 除了T1, T2和T3的高度都和NH有显著差异。CI儿童(植入年龄2—3岁)产出的各个字调在声学上也都可以区分, 但该组产出的所有字调都与NH儿童有差异(见附录)。

### 3.1.2 听觉经验的效应

为了在控制植入年龄的前提下考察听觉经验对字调发音的影响, 我们按照植入年龄将CI儿童分为3组: 植入年龄0—2年; 植入年龄2—3年; 植入年龄3—6年, 并使用混合效应模型将每一个CI儿童组的声调发音分别与NH儿童相比较(基于3个基频曲线参数: 高度、斜率和曲度)。每个模型中有两个固定因素: “分组”[4个水平: NH儿童, CI儿童(听觉经验0—2年), CI儿童(听觉经验2—3年), CI儿童(听觉经验3—6年)]和“声调”(4个水平: T1, T2, T3, T4), 以及一个协变量“生理年龄”和一个随机因素“被试”。其中, 由于被试人数不平衡, 植入年龄3—6岁的CI儿童的“分组”只有3个水平[NH儿童, CI儿童(听觉经验0—2年), CI儿童(听觉经验2—3年)]。

植入年龄0—2岁组: 图5显示了NH儿童和植入年龄0—2岁的CI儿童(听觉经验不同)的归一化字调基频曲线。植

年龄0—2岁的CI儿童的结果显示, “分组×声调”在高度  $F(9, 2888) = 40.96, p < 0.01$ , 斜率  $F(9, 2752) = 3.76, p < 0.01$  和曲度  $F(9, 2754) = 3.62, p < 0.01$  上有显著交互效应。

对“分组×声调”交互效应的Tukey-HSD事后检验分析结果显示, NH儿童可以产出不同字调。植入年龄0—2岁的CI儿童中, 听觉经验3—6年的CI儿童产出的各个字调在声学上都可以区分, 但T1, T2和T3的高度与NH儿童有显著差异。CI儿童(听觉经验2—3年)产出的T2和T3在声学上无法区分, 该组产出的T3和T4与NH儿童也有显著差异。CI儿童(听觉经验0—2年)产出的各个字调在声学上都可以区分, 但其产出的T2的曲度与NH儿童有差异(见附录)。

植入年龄2—3岁组: 图6显示了NH儿童和植入年龄2—3岁的CI儿童的归一化字调基频曲线。植入年龄2—3岁的CI儿童的结果显示, “分组×声调”在高度  $F(9, 4216) = 45.26, p < 0.01$ , 斜率  $F(9, 4060) = 9.11, p < 0.01$  和曲度  $F(9, 4061) = 6.83, p < 0.01$  上有显著交互效应。对“分组×声调”交互效应的Tukey-HSD事后检验分析结果显示, NH儿童产出的各个声调在声学上都可以区分。对于植入年龄2—3岁的CI儿童, 无论听觉经验长短, 产出的各个字调在声学上都可以区分。然而, CI儿童(听觉经验3—6年)产出的T2, T3和T4与NH儿童有差异; CI儿童(听觉经验2—3年)产出的T1, T3和T4与NH儿童有差异; CI儿童(听觉经验0—2年)产出的T3和T4与NH儿童有差异(见附录)。

植入年龄3—6岁组: 图7显示了NH儿童和植入年龄3—6岁的CI儿童的归一化字调基频曲线。植入年龄2—3岁的CI儿童的结果显示, “分组×声调”在高度  $F(6, 3649) = 94.34, p < 0.01$ , 斜率  $F(6, 3521) = 18.86, p < 0.01$  和曲度  $F(6, 3522) = 14.80, p < 0.01$  上有显著交互效应。对“分组×声调”交互效应的Tukey-HSD事后检验分析结果显示, 植入年龄3—6岁的CI儿童中, 听觉经验2—3

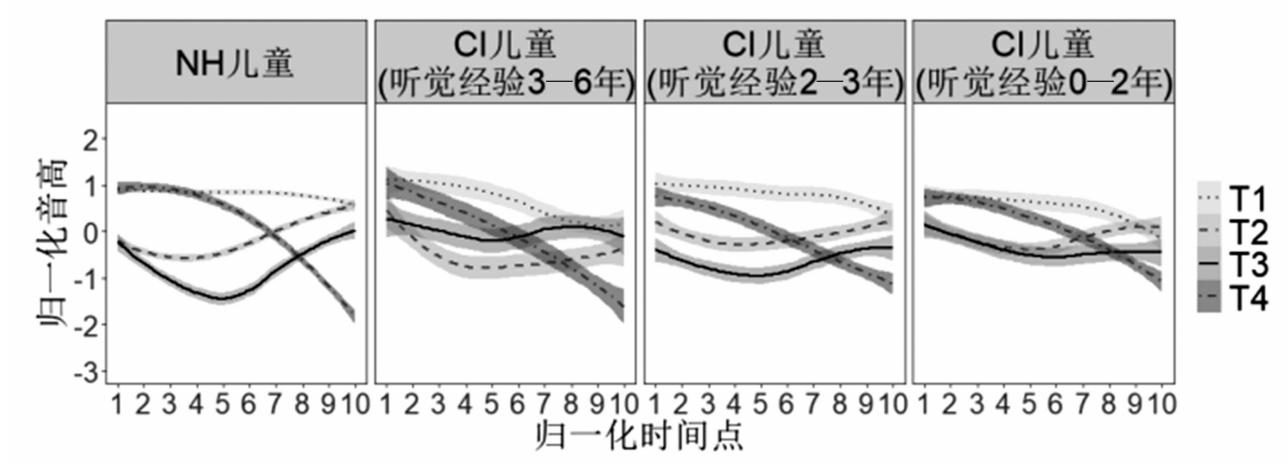


图6 NH 儿童和植入年龄2—3岁的CI 儿童归一化字调基频曲线

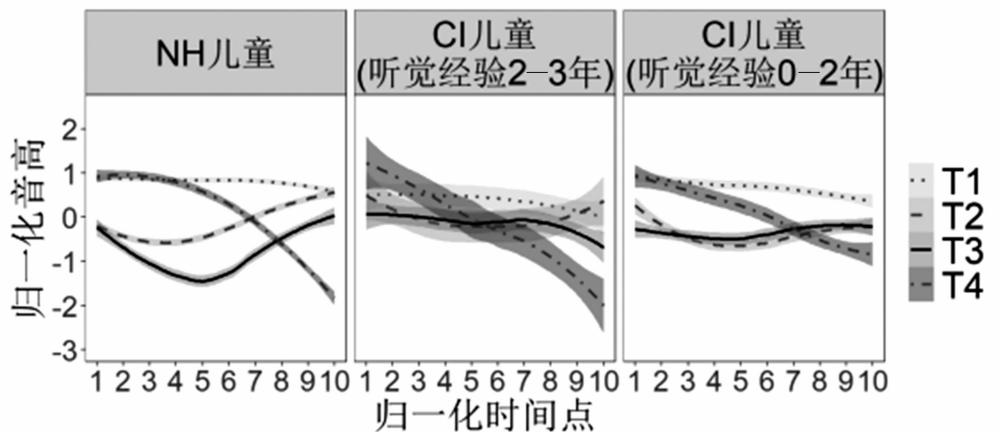


图7 NH 儿童和植入年龄3—6岁的CI 儿童归一化字调基频曲线

年组产出的 T1 和 T2, T2 和 T3 在声学上无法区分, 且该组产出的 T2 和 T3 与 NH 儿童有显著差异。CI 儿童 (听觉经验 0—2 年) 产出的各个声调在声学上都可以区分, 但该组产出的所有字调都与 NH 儿童有显著差异 (见附录)。

### 3.2 轻声实验结果

#### 3.2.1 植入年龄的效应

为了在控制听觉经验的前提下考察植入年龄对字调发音的影响, 我们按照听觉经验将 CI 儿童分为 3 组: 听觉经验 0—2 年; 听觉经验 2—3 年; 听觉经验 3—6 年, 并使用混合效应模型将每一个 CI 儿童组的轻声发音基频曲线和轻声音节时长比分别与 NH 儿童相比较 (基频曲线参数: 斜率和曲度; 轻声时长比: 轻声发音时长与轻声前字调发音时长的比值)。每

个模型中有三个固定因素, “分组” [4 个水平: NH 儿童, CI 儿童 (植入年龄 0—2 岁), CI 儿童 (植入年龄 2—3 岁), CI 儿童 (植入年龄 3—6 岁)], “前字声调” (2 个水平: 非 T3, 即 T1/2/4 后的轻声和 T3, 即 T3 后的轻声), “类别” (2 个水平: 叠词, 所有格词), 以及一个协变量“生理年龄”和一个随机因素“被试”。其中, 由于每组被试人数并不均衡, 听觉经验 3—6 年的 CI 儿童在“分组”中只有 3 个水平 [NH 儿童, CI 儿童 (植入年龄 0—2 岁), CI 儿童 (植入年龄 2—3 岁)]。

听觉经验 0—2 年组: 图 8 的黑框部分显示了 NH 儿童和听觉经验 0—2 年的 CI 儿童 (植入年龄不同) 的归一化轻声基频曲线。听觉经验 0—2 年的 CI 儿童的轻声基频曲线分析结果显示, “分组 × 前字声调” 在斜率上有显著交互效应,  $F(3, 5758) =$

37.95,  $p < 0.01$ 。Tukey-HSD 事后检验分析结果显示, NH 儿童 T3 后和非 T3 后的轻声发音有显著差异, 表明 NH 儿童能根据前字声调发出相应音高模式的轻声。听觉经验 0—2 年的 CI 儿童中, 植入年龄 3—6 岁组产出的 T3 后和非 T3 后的轻声发音有显著差异。比较各组 CI 儿童和 NH 儿童的轻声发音的结果则显示, 听觉经验 0—2 年的三

组 CI 儿童产出的非 T3 后轻声都与 NH 儿童有差异, 而其产出的 T3 后轻声都与 NH 儿童相似(见附录 7)。

图 9 显示了 NH 儿童和听觉经验 0—2 年的 CI 儿童(植入年龄不同)归一化轻声发音时长比(即轻声发音时长与轻声前字发音时长的比值)。该组儿童轻声时长比的分析结果发现了“分组 × 前字字调 × 类别”

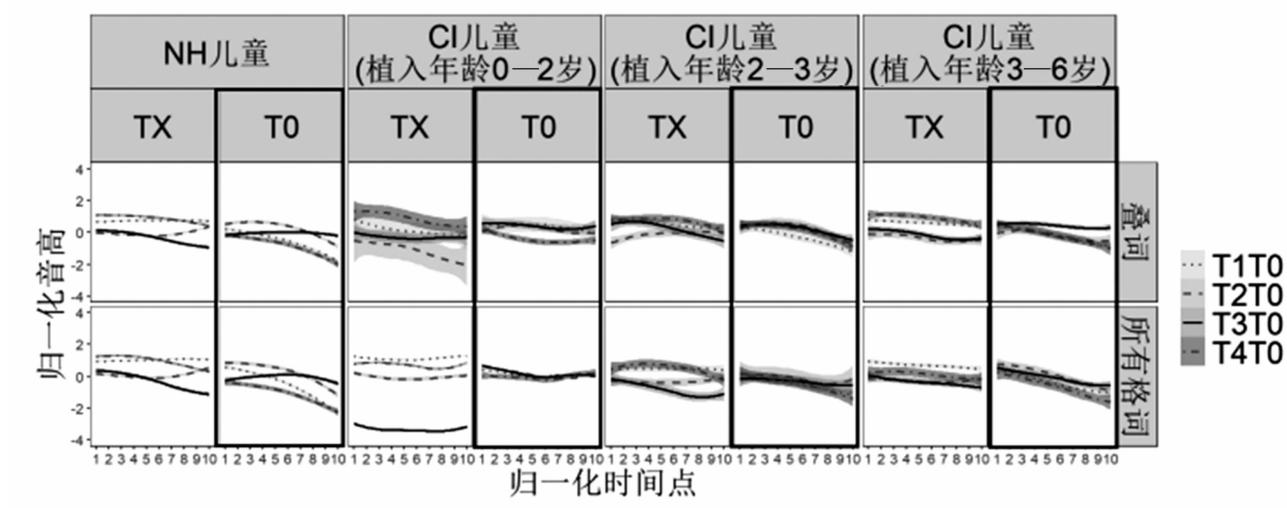


图 8 NH 儿童和听觉经验 0—2 年的 CI 儿童归一化轻声基频曲线

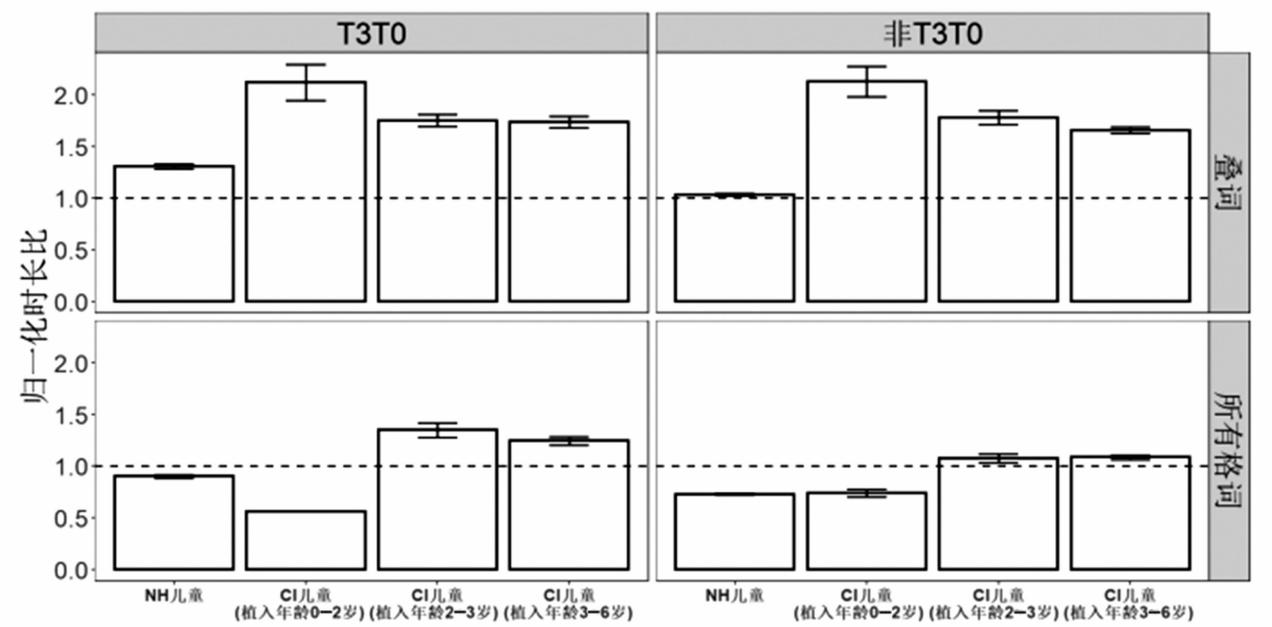


图 9 NH 儿童和听觉经验 0—2 年的 CI 儿童归一化轻声发音时长比

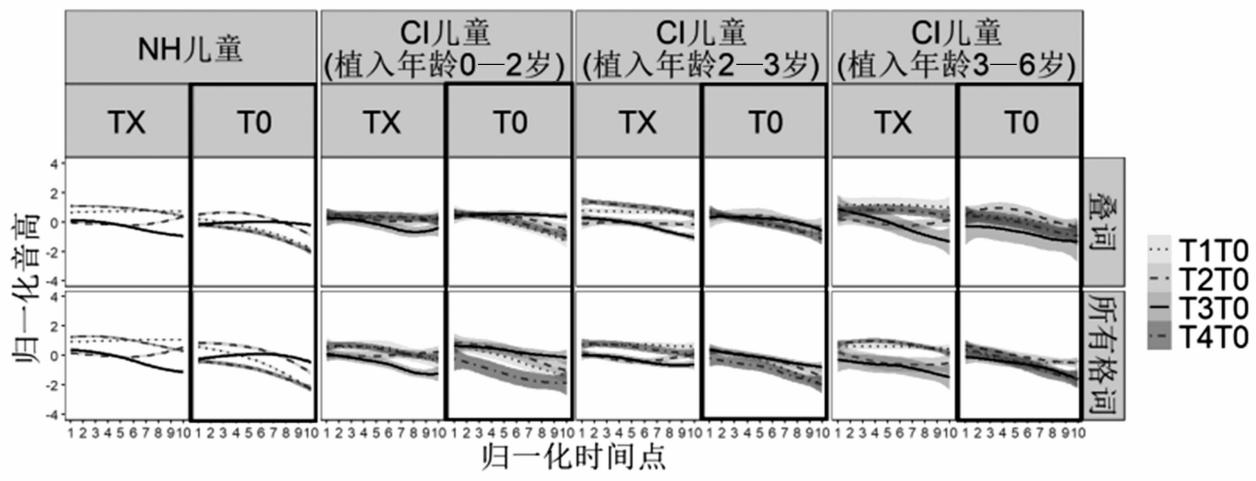


图10 NH儿童和听觉经验2—3年的CI儿童归一化轻声基频曲线

的显著交互效应,  $F(3, 6116) = 11.82$ ,  $p < 0.01$ 。Tukey-HSD 分析结果显示, 听觉经验 0—2 年的 CI 儿童中, 只有植入年龄 0—2 岁组的轻声发音时长比与 NH 儿童的轻声发音时长比无显著差异, 除了在非 T3 后的叠词中与 NH 儿童有显著差异。CI 儿童 (植入年龄 2—3 岁) 产出的轻声词中, 只有叠词中 T3 后的轻声发音时长比与 NH 儿童相似。CI 儿童 (植入年龄 3—6 岁) 产出的轻声词中, 只有所有格词中 T3 后和非 T3 后的轻声发音时长比与 NH 儿童相似 (见附录)。

听觉经验 2—3 年组: 图 10 的黑框部分显示了 NH 儿童和听觉经验 2—3 年的 CI 儿童的归一化轻声基频曲线。该组儿童的轻声音节基频曲线分析结果显示, “分组 × 前字声调” 在斜率上有显著交互效应,  $F(3, 5041) = 27.82$ ,  $p < 0.01$ 。Tukey-HSD 事后检验分析结果显示, NH 儿童 T3 后和非 T3 后的轻声发音有显著差异。听觉经验 2—3 年的 CI 儿童中, 植入年龄 0—2 岁组和植入年龄 2—3 岁组产出的 T3 后和非 T3 后的轻声发音有显著差异。比较各组 CI 儿童和 NH 儿童的轻声发音的结果则显示, 只有 CI 儿童 (植入年龄 0—2 岁组) T3 后轻声和非 T3 后轻声发音都与 NH 儿童相似 (见附录)。

图 11 显示了 NH 儿童和听觉经验 2—

3 年的 CI 儿童轻声发音的时长比。对该组儿童轻声音节时长比的分析结果发现了“分组 × 前字字调 × 类别”的显著交互效应,  $F(3, 5002) = 7.99$ ,  $p < 0.01$ 。Tukey-HSD 分析结果显示, 听觉经验 2—3 年的 CI 儿童中, 只有植入年龄 0—2 岁组在所有情况下的轻声发音时长比都与 NH 儿童的轻声发音时长比相似。CI 儿童 (植入年龄 2—3 岁) 产出的所有词中轻声发音时长比都与 NH 儿童有显著差异。CI 儿童 (植入年龄 3—6 岁) 产出的轻声词中, 非 T3 后的叠词中轻声发音时长比与 NH 儿童有显著差异 (见附录)。

听觉经验 3—6 年组: 图 12 的黑框部分显示了 NH 儿童和听觉经验 3—6 年的 CI 儿童的归一化轻声基频曲线。对该组儿童的轻声音节基频曲线的分析结果显示, “分组 × 前字声调” 在斜率上有显著交互效应,  $F(2, 4229) = 22.02$ ,  $p < 0.01$ 。Tukey-HSD 事后检验分析结果显示, NH 儿童 T3 后和非 T3 后的轻声发音有显著差异。听觉经验 3—6 年的 CI 儿童中, 只有植入年龄 0—2 岁组产出的 T3 后和非 T3 后的轻声发音有显著差异。比较各组 CI 儿童和 NH 儿童的轻声发音的结果则显示, CI 儿童 (植入年龄 0—2 岁) 和 CI 儿童 (植入年龄 2—3 岁) 都只有 T3 后的轻声发音与 NH 儿童相似 (见附录)。

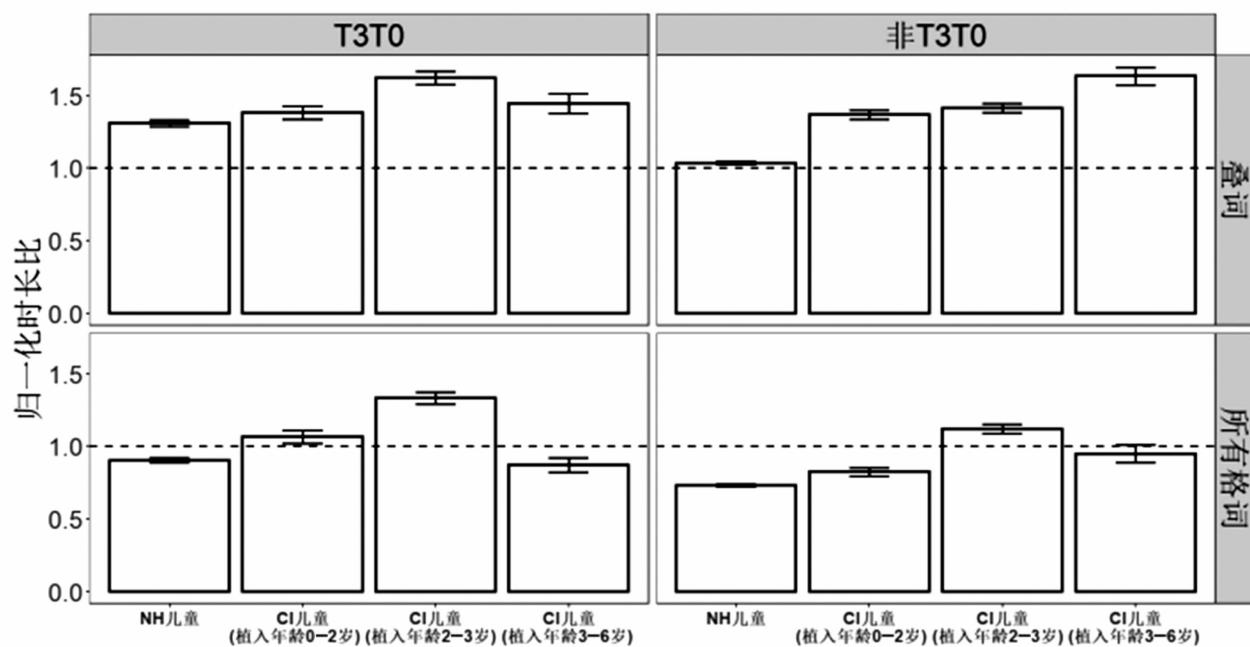


图 11 NH 儿童和听觉经验 2—3 年的 CI 儿童归一化轻声发音时长比

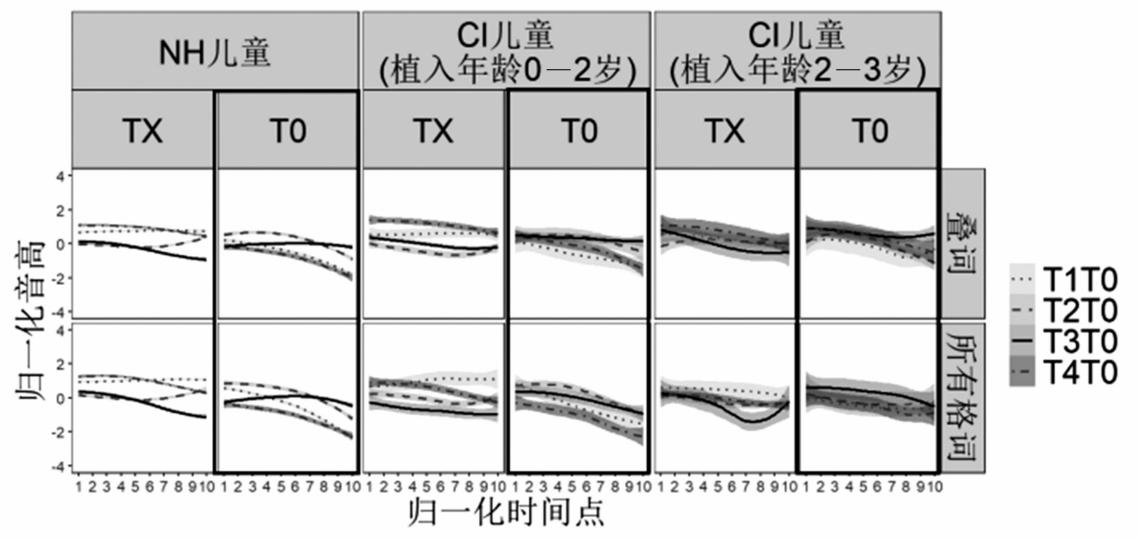


图 12 NH 儿童和听觉经验 3—6 年的 CI 儿童归一化轻声基频曲线

图 13 显示了 NH 儿童和听觉经验 3—6 年的 CI 儿童归一化轻声发音时长比。该组儿童轻声音节时长比的分析结果发现了“分组 × 前字字调 × 类别”的显著交互效应,  $F(2, 4289) = 38.55, p < 0.01$ 。Tukey-HSD 分析结果显示, 听觉经验 3—6 年的 CI 儿童中, 只有植入年龄 0—2 岁组所有轻声发音时长比都与 NH 儿童的轻声发音时长比相似。CI 儿童（植入年龄 2—3 岁）产出的轻声中, 只有 T3 后的所有格

词中的发音时长比接近 NH 儿童（见附录）。

### 3.2.2 听觉经验的效应

为了在控制植入年龄的前提下考察听觉经验对字调发音的影响, 我们按照植入年龄将 CI 儿童分为 3 组: 植入年龄 0—2 年; 植入年龄 2—3 年; 植入年龄 3—6 年, 并使用混合效应模型将每一个 CI 儿童组的轻声发音基频曲线和轻声音节时长比分别与 NH 儿童相比较（基频曲线参

数：斜率和曲度；轻声发音时长比）。每个模型中有三个固定因素，“分组”[4个水平：NH 儿童，CI 儿童（听觉经验 0—2 年），CI 儿童（听觉经验 2—3 年），CI 儿童（听觉经验 3—6 年）]，“前字声调”（2 个水平：非 T3，即 T1/2/4 后的轻声和 T3，即 T3 后的轻声），“类别”（2 个水平：叠词，所有格词），以及一个协变量“生理年龄”和一个随机因素“被试”。其中，由于被试人数不平衡，植入年龄 3—6 岁的 CI 儿童的“分组”只有 3 个水平 [NH 儿童，CI 儿童（听觉经验 0—2

年），CI 儿童（听觉经验 2—3 年）]。

植入年龄 0—2 岁组：图 14 的黑框部分显示了 NH 儿童和植入年龄 0—2 岁的 CI 儿童（听觉经验不同）的归一化轻声基频曲线。该组儿童轻声音节基频曲线的分析结果显示，“分组 × 前字声调”在斜率上有显著交互效应， $F(3, 4560) = 14.61, p < 0.01$ 。Tukey-HSD 事后检验分析结果显示，NH 儿童 T3 后和非 T3 后的轻声发音有显著差异，表明 NH 儿童能根据前字声调发出相应音高模式的轻声。植入年龄 0—2 岁的 CI 儿童中，听觉经验

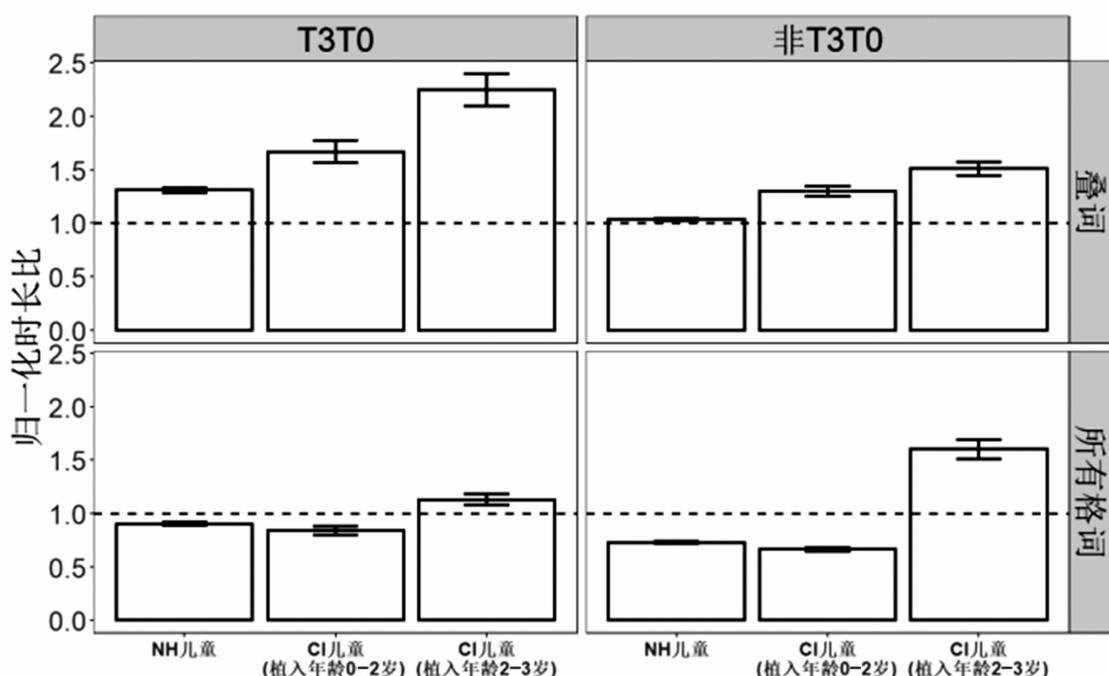


图 13 NH 儿童和听觉经验 3—6 年的 CI 儿童归一化轻声发音时长比

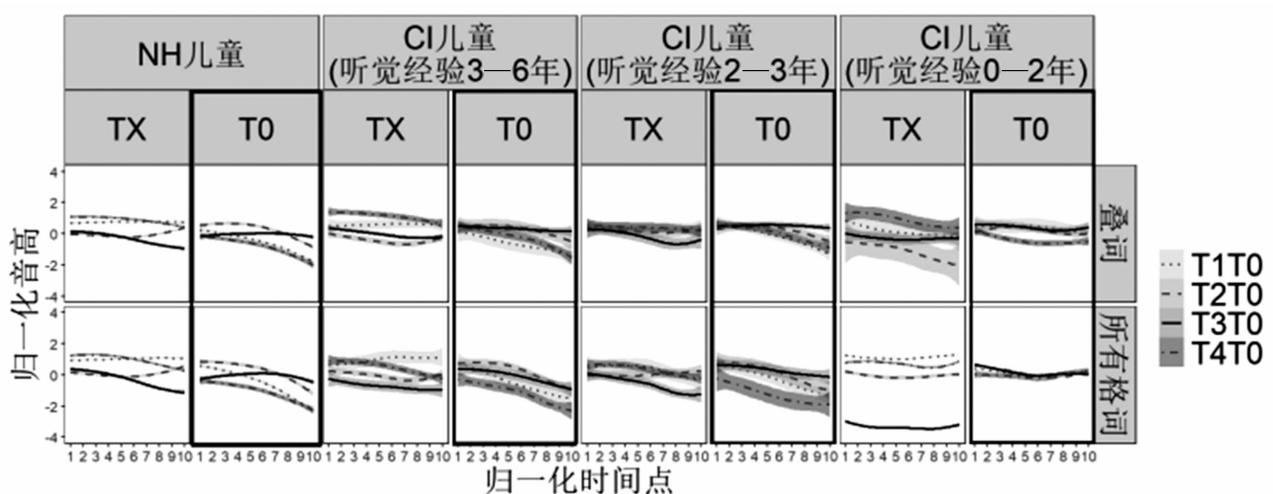


图 14 NH 儿童和植人年龄 0—2 岁 CI 儿童归一化轻声基频曲线

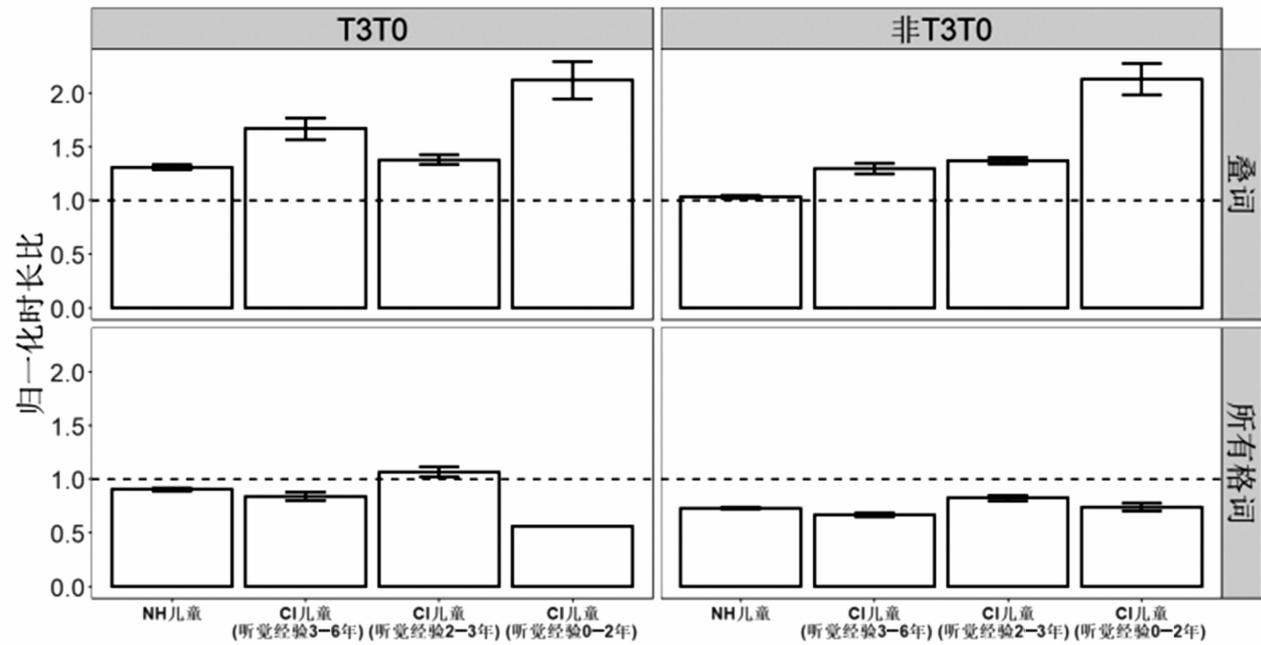


图 15 NH 儿童和植人年龄 0—2 岁 CI 儿童归一化轻声发音时长比

3—6 年组和听觉经验 2—3 年组产出的 T3 后和非 T3 后的轻声发音有显著差异。比较各组 CI 儿童和 NH 儿童的轻声发音的结果则显示，只有 CI 儿童（听觉经验 2—3 年组）T3 后和非 T3 后的轻声发音都与 NH 儿童相似（见附录）。

图 15 显示了 NH 儿童和植人年龄 0—2 岁的 CI 儿童（听觉经验不同）归一化轻声发音时长比。该组儿童轻声发音时长比的分析结果发现了“分组 × 前字字调 × 类别”的显著交互效应， $F(3, 4531) = 7.12, p < 0.01$ 。Tukey-HSD 分析结果显示，植人年龄 0—2 岁的 CI 儿童中，听觉经验 3—6 年和听觉经验 2—3 年组的轻声发音时长比都与 NH 儿童的轻声发音时长比相似，但听觉经验 0—2 年组儿童的发音中，只有非 T3 后所有格词中的轻声发音时长比接近 NH 儿童（见附录）。

植人年龄 2—3 岁组：图 16 的黑框部分显示了 NH 儿童和植人年龄 2—3 岁的 CI 儿童的归一化轻声基频曲线。该组儿童轻声音节基频曲线的分析结果显示，“分组 × 前字声调”在斜率上有显著交互效应， $F(3, 5383) = 35.18, p < 0.01$ 。Tukey-HSD 事后检验分析结果显示，NH 儿童 T3 后和

非 T3 后的轻声发音有显著差异，表明 NH 儿童能根据前字声调发出相应音高模式的轻声。植人年龄 2—3 岁的 CI 儿童中，只有听觉经验 2—3 年组产出的 T3 后和非 T3 后的轻声发音有显著差异。比较各组 CI 儿童和 NH 儿童的轻声发音的结果则显示，所有 CI 儿童产出的 T3 后轻声都与 NH 儿童相似，非 T3 后的轻声发音都与 NH 儿童有显著差异（见附录）。

图 17 显示了 NH 儿童和植人年龄 2—3 岁的 CI 儿童归一化轻声发音时长比。该组儿童轻声音节时长比的分析结果发现了“分组 × 前字字调 × 类别”的显著交互效应， $F(3, 5496) = 30.94, p < 0.01$ 。Tukey-HSD 分析结果显示，植人年龄 2—3 岁的 CI 儿童中，听觉经验 3—6 年组儿童产出的非 T3 后叠词的轻声发音时长比和 T3 后所有格词的轻声发音时长比与 NH 儿童相似。CI 儿童（听觉经验 2—3 年）产出的 T3 和非 T3 后叠词的轻声发音时长比都与 NH 相似。CI 儿童（听觉经验 0—2 年）产出的轻声发音时长比都与 NH 儿童有显著差异（见附录）。

植人年龄 3—6 岁组：图 18 的黑框部分显示了 NH 儿童和植人年龄 3—6 岁的

CI 儿童的归一化轻声基频曲线。该组儿童轻声音节的基频曲线的分析结果显示, “分组×前字声调” 在斜率上有显著交互效应,  $F(2, 5078) = 48.61, p < 0.01$ 。Tukey-HSD 事后检验分析结果显示, NH 儿童 T3 后和非 T3 后的轻声发音有显著差异, 表明 NH 儿童能根据前字声调发出相

应音高模式的轻声。植人年龄 3—6 岁的 CI 儿童中, 只有听觉经验 0—2 年组产出的 T3 后和非 T3 后的轻声发音有显著差异。比较各组 CI 儿童和 NH 儿童的轻声发音的结果则显示, 所有 CI 儿童产出的 T3 后轻声都与 NH 儿童相似, 非 T3 后的轻声发音都与 NH 儿童有显著差异 (见附录)。

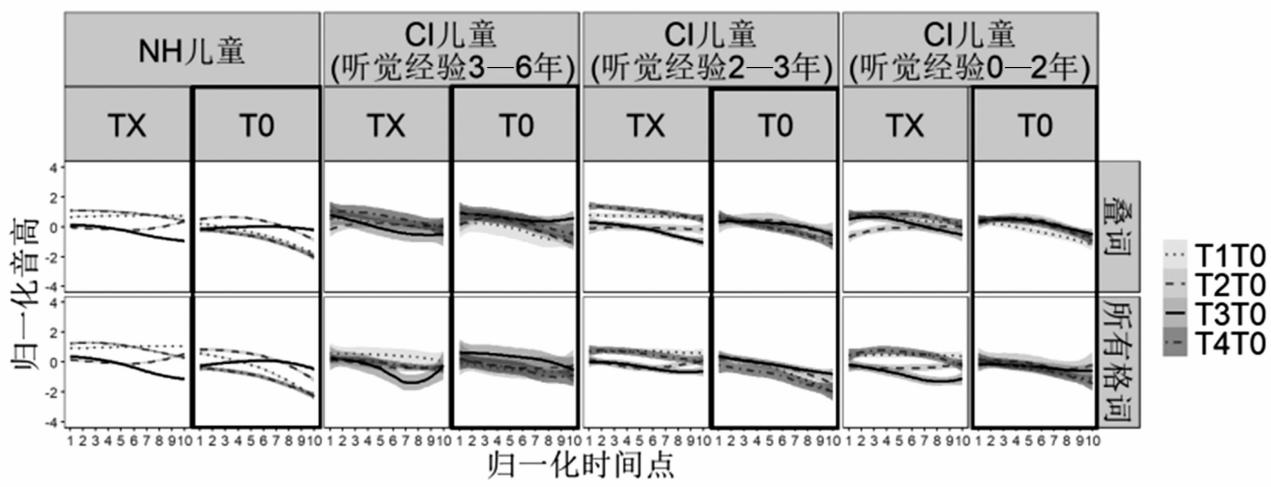


图 16 NH 儿童和植人年龄 2—3 岁 CI 儿童归一化轻声基频曲线

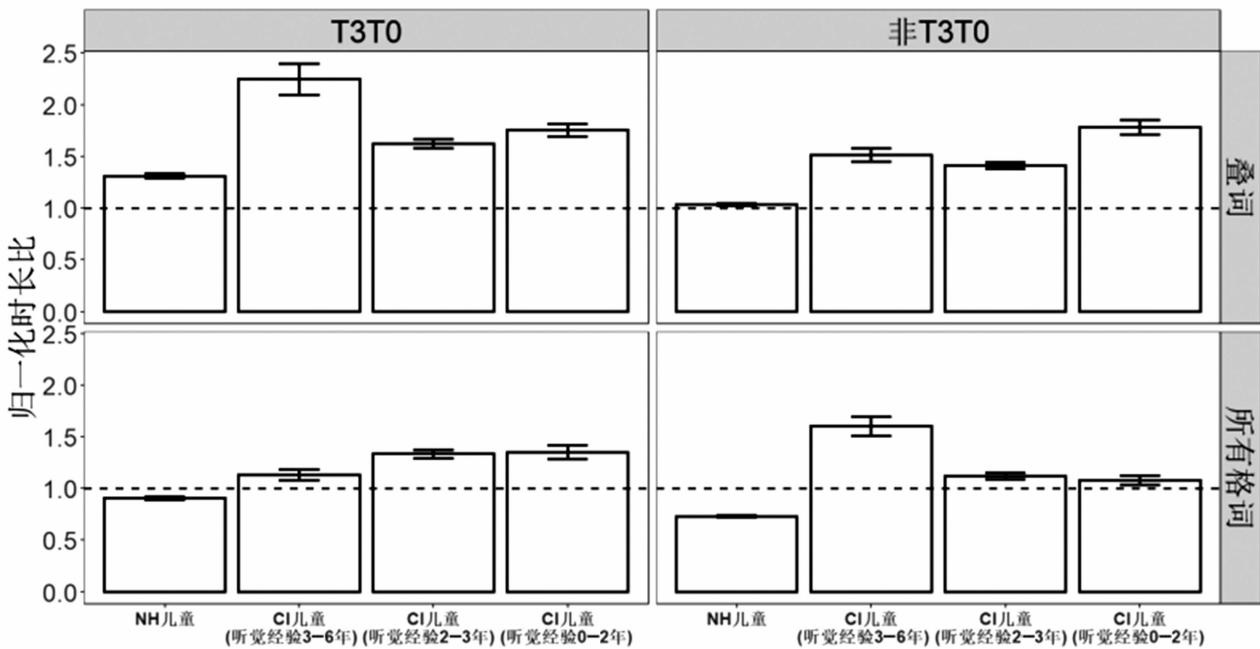


图 17 NH 儿童和植人年龄 2—3 岁 CI 儿童归一化轻声时长比

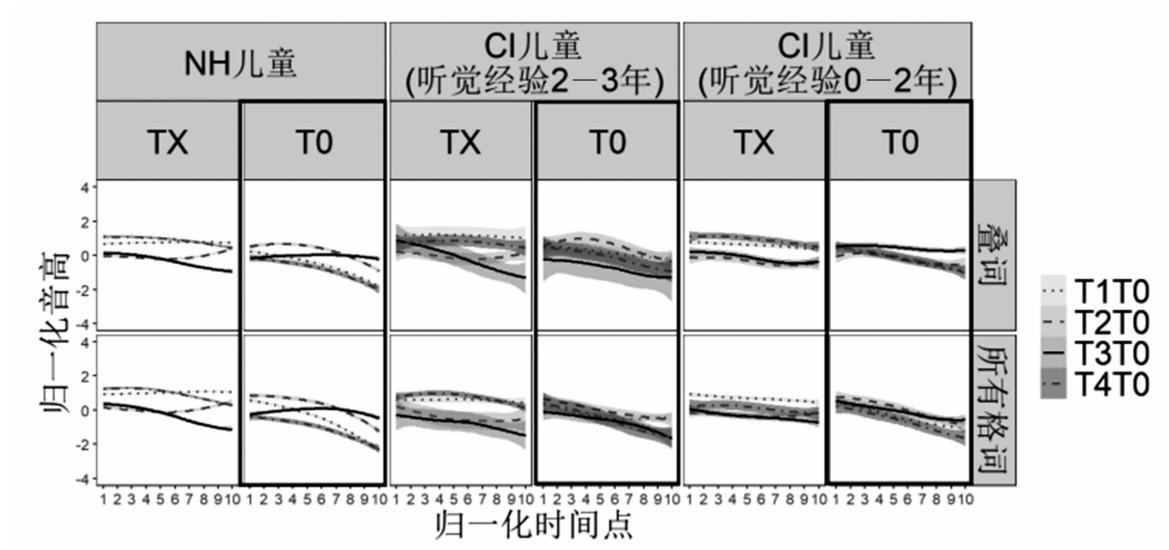


图18 NH儿童和植入年龄3—6岁CI儿童归一化轻声基频曲线

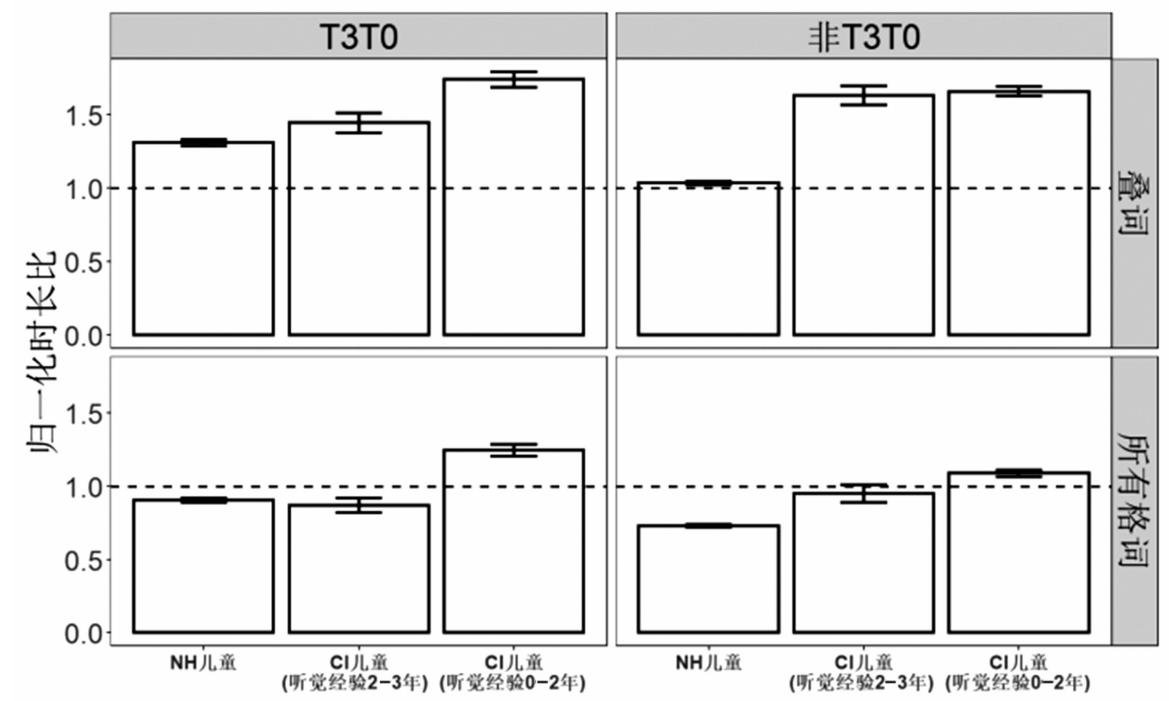


图19 NH儿童和植入年龄3—6岁CI儿童归一化轻声发音时长比

图19显示了NH儿童和植入年龄3—6岁的CI儿童归一化轻声发音时长比。该组儿童轻声音节时长比的分析结果发现了“分组×前字字调×类别”对的显著交互效应,  $F(2, 5379) = 5.97, p < 0.01$ 。Tukey-HSD分析结果显示, 植入年龄3—6岁的CI儿童中, 听觉经验2—3年组儿童产出的非T3后叠词的轻声发音时长比与NH儿童有显著差异。CI儿童(听觉经验

0—2年)在所有情况下产出的轻声发音时长比都与NH有显著差异(见附录18)。

#### 4. 讨论

本研究采用声学分析的方式, 考察了人工耳蜗儿童普通话声调习得的情况, 包括字调和轻声的习得, 并将植入年龄和听觉经验两种因素纳入考量。对植入年龄的

分析结果显示, 不论听觉经验长短, 早期(2岁前)植入的儿童都是人工耳蜗儿童中声调产出最接近健听儿童的组。早期植入的人工耳蜗儿童和健听儿童一样, 其产出的四个字调在声学上都可以区分。此外, 早期植入的人工耳蜗儿童也正确掌握了轻声“短而轻”的特点, 即根据前字音节的声调产出相应音高模式的轻声; 其声调发音也基本达到健听儿童水平(除了个别组产出的T3的曲度, T4的斜率和曲度, 以及T1, T2和T3的高度, 个别语境下的轻声发音和健听儿童有差异)。对听觉经验的分析结果显示, 不论植入早晚, 长期(3—6年)经验的人工耳蜗儿童都无法准确发出字调和轻声, 他们在区分不同字调和掌握轻声“短而轻”的发音特点上仍然面临挑战。此外, 在所有CI儿童中, 长期经验组并没有显示出声调产出的优势。因此, 对于人工耳蜗儿童而言, 2岁前植入人工耳蜗似乎是其准确掌握汉语声调(包括字调和轻声)的发音规律, 达到健听儿童发音水平的关键。

作为 Tang 等 (2019a) 的延续, 本文在扩大研究样本(尤其是早期植入儿童, 从先前研究的7人扩大到了现在的27人)的基础上考察了植入年龄对人工耳蜗儿童声调产出的作用, 研究结果证实了其发现中的早期植入对声调习得的积极作用。这一发现也与先前基于听辨结果的研究一致(如 Peng 等, 2004; Han 等, 2007), 这两项研究都认为植入年龄是影响声调产出的重要因素, 且声调产出的正确率与植入年龄呈负相关。早期植入的优势或许与儿童语言发展的“关键期”有关。有研究认为, 儿童中枢听觉系统的发育存在“关键期”, 即在幼儿期(42月龄)中枢听觉系统的可塑性最强, 而早期听觉缺失会使得中枢听觉系统大幅度退化(Lee 等, 2001; Finny 等, 2001)。然而, 随着听力恢复, 听觉中枢系统也有机会继续发育。例如, Sharman 等 (2002) 发现, 在3岁半前植入人工耳蜗的听障儿童, 在人工耳蜗开机后, 其中枢听觉系统能在声音信号的刺激下迅速发育, 数月内就能达到同龄健听儿童的发育水平。然而, Lee 等 (2001) 发

现植入人工耳蜗较晚的语前聋儿童, 其中枢听觉系统发育在耳蜗开机一年后依旧迟缓。这两项研究的结果表明, 植入人工耳蜗能够为听障儿童听觉中枢系统的发育提供机会, 但只有早期植入才能够帮助听障儿童尽早恢复中枢听觉系统的正常发育。此外, 有研究表明, 汉语儿童习得声调的关键期是两岁前(Li 等, 2017)。因此, 早期植入不仅能够帮助听障儿童尽早重拾听力, 也能使其尽可能在声调习得关键期内就和健听儿童一样接触声音刺激, 开始声调习得, 而这可能就是早期植入儿童在声调产出上存在优势的原因之一。

早期植入对声调习得的优势或许还来自对多种声学线索的综合运用。在汉语中, 不同声调之间除了基频信息这一主要声学区分线索, 还可以通过时域信息, 音强轮廓等次要线索进行区分(Fu & Zeng, 2000)。例如, Fu 和 Zeng (2000) 对健听成人的发音进行了分析, 发现其声调的音强轮廓与基频曲线相类似, 两者呈正相关关系, 且不同声调也具有独特的时长模式, 说明汉语声调也可以依靠次要声学线索区分。卢静和汤平(2021接收, 待发表)考察了植入年龄对人工耳蜗儿童使用时域和音强线索对区别汉语声调的影响, 结果显示, 植入年龄越早的儿童越能更好地利用这些次要声学线索区分汉语声调。因此, 在基频信息受限的情况下, 早期植入或许可以帮助人工耳蜗儿童更好地通过次要声学线索准确感知声调, 并建立起正确的声调表征。

接着, 本文考察了听觉经验对人工耳蜗儿童声调产出的作用。结果显示, 即使是听觉经验较长的人工耳蜗儿童在声调习得上也面临种种挑战, 如无法像早期植入儿童那样在产出上正确区分T2和T3这两个字调, 也无法掌握轻声的发音特点(虽然其可以掌握轻声音节较短的时长特征)。综合来看, 长期听觉经验对人工耳蜗儿童习得声调系统中复杂的音高特征的效果相对有限。这一发现与 Han 等 (2007) 的结论不一致, 该研究认为听觉经验也是影响人工耳蜗儿童声调产出的重要因素, 且声调产出的正确率与听觉经验呈正相关。但

该研究采用人工听辨的方式对儿童声调发音进行评估, 通过相关分析发现了人工耳蜗儿童内部的听觉经验与其声调发音分数的正相关关系。而本研究采用声学分析的方式, 在声学上对人工耳蜗儿童和健听儿童的声调发音进行对比, 并考察听觉经验对于帮助人工耳蜗儿童声调产出接近健听儿童的作用。因此, 听觉经验或许可以帮助人工耳蜗儿童提升声调产出的表现, 但这种提升可能无法抹平与健听儿童之间的差异, 从而呈现出本研究中的结果。因此, 本研究和 Han 等 (2007) 之所以结论不一致, 可能是因为采用的研究方法差异较大, 关注的重点不同。

本研究的结果也进一步证实了人工耳蜗儿童在声调产出上依旧面临挑战。结果显示, 健听儿童可以产出不同的字调, 但大部分人工耳蜗儿童无法在声学上区分 T2 和 T3。这一结果与潘慧等 (2021) 一致, 其研究通过人工听辨的方式考察人工耳蜗儿童声调产出的情况, 发现人工耳蜗儿童阳平和上声的偏误率较高, 表明人工耳蜗儿童在声学上区分阳平和上声存在困难。根据以往的文献, 人工耳蜗儿童在区分 T2 和 T3 字调面临的困难可以从感知和产出两方面进行解释。汉语声调的 T2 和 T3 十分类似, 具体体现为两个字调的基频曲线都有上扬部分, 主要区别在于二者基频曲线转折点不同 (Shen & Lin, 1991)。而对于人工耳蜗儿童而言, 准确感知音高曲线精细的转折点必然十分困难, 从而造成其对 T2 和 T3 在感知上的混淆。再者, 准确地发出上扬的声调需要发音人有灵活控制肌肉的能力, 使其能在精确的时间点降低和提高基频。而有研究认为, 由于听力发育滞后, 人工耳蜗儿童在精准控制发音器官上面临困难, 因此准确发出 T2 和 T3 对人工耳蜗儿童而言颇具挑战 (Wong 等, 2005)。

同时, 本研究发现, 许多 CI 儿童在产出两种不同轻声方面存在困难, 即无法区分 T3 后轻声和非 T3 后轻声。这可能是受到了轻声前字声调发音的影响。先前研究发现, 轻声的基频曲线与前字声调有关, 轻声在 T1, T2, T4 后是降调, 在 T3

后是平调或升调 (曹剑芬, 1995)。因此 CI 儿童能否区分 T3 与其他字调可能是前字声调是否会影响轻声发音的关键。能够区分 T3 和其他声调, 儿童才能在不同的声调后产出对应的轻声。而本研究中, 大部分 CI 儿童在产出上容易混淆 T2 和 T3, 因此, CI 儿童的轻声发音可能受到了前面字调发音不到位的影响, 尤其是混淆 T2 和 T3 的影响。

此外, 本研究发现人工耳蜗儿童在习得轻声音节的时长特征上也面临挑战。轻声产出实验的结果显示, 相对于健听儿童, 人工耳蜗儿童产出的轻声发音时长一般会更长, 这与以往的研究结果一致 (Uchanski & Geers, 2003)。例如, Uchanski 和 Geers (2003) 发现人工耳蜗儿童通常说话速度较慢, 且他们产出的元音, 单词和句子的时长都更长。因此, 人工耳蜗儿童轻声发音时长较长可能与其本身说话速度慢有关。但人工耳蜗儿童对轻声时长特征的把握不够准确也可能与其语言输入有关。特殊教育教师或康复师在对人工耳蜗儿童进行言语康复治疗时, 常常会采用夸张化的说话方式, 并且倾向于通过拉长音节来强调所教内容, 这可能会导致本该“短而轻”的轻声音节时长变长。“时长短”是轻声的重要特征, 从普通话为母语的人工耳蜗儿童如果无法掌握轻声发音的时长特征, 则可能会影响日常言语交流。未来的研究可以通过观察特教老师和康复师与人工耳蜗儿童之间的互动, 进一步考察人工耳蜗儿童语速慢的原因。

最后, 本研究也有一定的局限性。首先, 本研究使用的实验语料不够丰富。在字调发音实验中, 每个字调只提取了一个字的发音, 且只涉及单音节字的字调。然而连续语言中的字调发音可能会随语境发生变化, 人工耳蜗儿童能否成功产出这些变调现象值得进一步考察。此外, 本研究在按照植入年龄和听觉经验分组时, 各组被试人数不够均衡, 且个体差异较大。未来的研究可以尝试进一步增加被试数量, 并保证各组被试均衡, 从而增强分析结果的可信度和适用性。

## 5. 结论

本研究通过声学分析的方法对人工耳蜗儿童和健听儿童汉语字调和轻声的发音进行了对比，并考察了植入年龄和听觉经验对人工耳蜗儿童汉语声调习得的作用。结果发现，虽然人工耳蜗儿童在产出声调（包括字调和轻声）上存在种种困难，但是早期（2岁前）植入的儿童可以准确地产出和健听儿童基本类似的声调发音。因此，本研究通过声学证据证明了早期植入对于声调习得的重要性，其中，2岁前植入是习得与健听儿童相类似声调发音水平的关键。

## 6. 致谢

本研究得到了国家社科基金项目“人工耳蜗植入儿童汉语语调的习得机制研究”(20CYY012)的经费支持。感谢审稿人提出的宝贵意见。

## 参考文献

- Bates, D., Mächler, M., Bolker, B., & Walker, S. (2014). R package version lme4: Linear mixed-effects models using Eigen and S4. *Journal of Statistical Software*, 1 (7), 1–23.
- Boersma, P., & Weenink, D. (2018). Praat: Doing phonetics by computer (Version 6.0.37) [Computer program]. Retrieved from <https://www.praat.org>.
- Chang, C. (1998). The development of autonomy in preschool Mandarin Chinese-speaking children's play narratives. *Narrative Inquiry*, 8 (1), 77–111.
- Ching, T. Y., Dillon, H., Leigh, G., & Cupples, L. (2018). Learning from the Longitudinal Outcomes of Children with Hearing Impairment (LO-CHI) study: Summary of 5-year findings and implications. *International Journal of Audiology*, 57 (2, Suppl), S105–S111.
- Deng, X., & Yip, V. (2018). A multimedia corpus of child Mandarin: The Tong corpus. *Journal of Chinese Linguistics*, 46 (1), 69–92.
- Finney, E. M., Fine, I., & Dobkins, K. R. (2001). Visual stimuli activate auditory cortex in the deaf. *Nature Neuroscience*, 4 (12), 1171–1173.
- Fu, Q. J., & Zeng, F. G. (2000). Identification of temporal envelope cues in Chinese tone recognition. *Asia Pacific Journal of Speech, Language and Hearing*, 5 (1), 45–57. <https://doi.org/10.1179/136132800807547582>.
- Gauthier, B., Shi, R., & Xu, Y. (2007). Learning phonetic categories by tracking movements. *Cognition*, 103, 80–106.
- Han, D., Zhou, N., Li, Y., Chen, X., Zhao, X., & Xu, L. (2007). Tone production of Mandarin Chinese speaking children with cochlear implants. *International Journal of Pediatric Otorhinolaryngology*, 71 (6), 875–880.
- Hua, Z. (2002). *Phonological development in specific contexts: Studies of Chinese-speaking children* (Vol. 3). Bristol: Multilingual Matters.
- Hua, Z., & Dodd, B. (2000). The phonological acquisition of Putonghua (modern standard Chinese). *Journal of Child Language*, 27 (1), 3–42.
- Kuznetsova, A., Brockhoff, P. B., & Christensen, R. H. B. (2015). Package “lmerTest” (R Package Version 2.0). Retrieved from <https://cran.r-project.org/web/packages/lmerTest/index.html>.
- Lee, D. S., Lee, J. S., Oh, S. H., Kim, S. K., Kim, J. W., Chung, J. K., Lee, M. C. & Kim, C. S. (2001). Cross-modal plasticity and cochlear implants. *Nature*, 409 (6817), 149–150.
- Li, C. N., & Thompson, S. A. (1977). The acquisition of tone in Mandarin-speaking children. *Journal of Child Language*, 4, 185–199.
- Li, G., Soli, S. D., & Zheng, Y. (2017). Tone perception in Mandarin-speaking children with cochlear implants. *International Journal of Audiology*, 56 (Supple2), S49–S59.
- MacWhinney, B. (2000). *The CHILDES Project: Tools for analyzing talk* (3rd ed.). New Jersey: Lawrence Erlbaum Associates.
- Mirman, D. (2014). *Growth curve analysis and visualization using R*. Boca Raton, FL: Chapman & Hall/CRC.
- Peng, G. (2006). Temporal and tonal aspects of Chinese syllables: A corpus-based comparative study of Mandarin and Cantonese. *Journal of Chinese Linguistics*, 34 (1), 134–154.
- Peng, S. C., Tomblin, J. B., Cheung, H., Lin, Y. S., & Wang, L. S. (2004). Perception and production of Mandarin tones in prelingually deaf children with cochlear implants. *Ear and Hearing*, 25 (3), 251–264.

- Pham, C. Q. , Bremen, P. , Shen, W. , Yang, S. M. , Middlebrooks, J. C. , Zeng, F. G. , & McLaughlin, M. (2015). Central auditory processing of temporal and spectral-variance cues in cochlear implant listeners. *PLoS One*, 10, e0132423.
- R Core Team. (2016). R: A language and environment for statistical computing (Version 3.3.1) [Computer program]. Retrieved from <https://www.R-project.org/>.
- Sharma, A. , Spahr, A. , Dorman, M. , & Todd, N. W. (2002). Early cochlear implantation in children allows normal development of central auditory pathways. *Annals of Otology, Rhinology & Laryngology*, 111 (Supple5), 38–41.
- Shen, X. S. , & Lin, M. (1991). A perceptual study of Mandarin tones 2 and 3. *Language and Speech*, 34 (2), 145–156.
- Tang, P. , Yuen, I. , Rattanasone, N. , Gao, L. , Demuth, K. (2019a). The acquisition of Mandarin tonal processes by children with cochlear implants. *Journal of Speech, Language, and Hearing Research*, 62 (5), 1309–1325.
- Tang, P. , Yuen, I. , Xu Rattanasone, N. , Gao, L. , Demuth, K. (2019b). Acquisition of weak syllables in tonal languages: Acoustic evidence from neutral tone in Mandarin Chinese. *Journal of Child Language*, 46, 24–25.
- Tang, P. , Yuen, I. , Rattanasone, N. X. , Gao, L. , & Demuth, K. (2019c). The acquisition of phonological alternations: The case of the Mandarin tone sandhi process. *Applied Psycholinguistics*, 40 (6), 1495–1526.
- Tang, P. , Yuen, I. , Rattanasone, N. X. , Gao, L. , & Demuth, K. (2021). Longer cochlear implant experience leads to better production of Mandarin tones for early implanted children. *Ear and Hearing*, 42 (5), 1405–1411.
- Tupper, P. , Leung, K. , Wang, Y. , Jongman, A. , & Sereno, J. A. (2020). Characterizing the distinctive acoustic cues of Mandarin tones. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 147 (4), 2570–2580.
- Uchanski, R. M. , & Geers, A. E. (2003). Acoustic characteristics of the speech of young cochlear implant users: A comparison with normal-hearing age-mates. *Ear and Hearing*, 24 (suppl. ), 90–105.
- Vandali, A. E. , & van Hoesel, R. J. (2012). Enhancement of temporal cues to pitch in cochlear implants: Effects on pitch ranking. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 132 (1), 392–402.
- Wong, P. , Schwartz, R. G. , & Jenkins, J. J. (2005). Perception and production of lexical tones by 3-year-old, Mandarin-speaking children. *Journal of Speech, Language, and Hearing Research*, 48 (5), 1065–1079.
- Xu, L. , Li, Y. , Hao, J. , Chen, X. , Xue, S. A. , Han, D. (2004). Tone production in Mandarin-speaking children with cochlear implants: a preliminary study. *Acta Oto-laryngologica*, 124, 363–367.
- Zhou, N. , Huang, J. , Chen, X. , & Xu, L. (2013). Relationship between tone perception and production in prelingually-deafened children with cochlear implants. *Otology & Neurotology*, 34 (3), 499–506.
- 曹剑芬:《连读变调与轻重对立》,《中国语文》1995年第4期,第312—320页。
- 卢静、汤平:《人工耳蜗植入儿童声调发音的次要声学线索:年龄因素的影响》,《中国听力语言康复科学杂志》,2021年接收,待发表。
- 毛弈韬、伍伟景、谢鼎华:《中国耳蜗植入者声调感知能力研究进展》,《中华耳科学杂志》2012年第3期,第392—396页。
- 潘慧、陈雪清、李炀、孟超、郭倩倩、郑雪琴:《婴幼儿期植入人工耳蜗的语前聋儿童单字声调产出特点》,《听力学及言语疾病杂志》2021年第3期,第276—281页。
- 汤平:《日本高级汉语学习者汉语轻声韵律习得偏误分析》,《华文教学与研究》2014年第4期,第39—47页。
- 王硕、Mannell、张华:《汉语声调在国内外人工耳蜗相关领域的研究现状》,《中华耳鼻咽喉头颈外科杂志》2011年第2期,第164—167页。
- 徐立、周宁:《人工耳蜗植入与声调语言》,《中国医学文摘:耳鼻咽喉科学》2013年第4期,第196—199页。

## 余千禧

硕士研究生,南京理工大学外国语学院,主要研究领域为实验语音学。

Email: ahijessi@outlook.com

## 沈娅南

硕士研究生,南京理工大学外国语学院,主要研究领域为实验语音学。

Email: Shenyn@njust.edu.cn

## 王丽燕

博士,中国听力语言康复研究中心研究员,主要研究领域为听力康复。

Email: wangliyan@ crrchsi. org. cn

汤 平

博士, 南京理工大学外国语学院语言信息  
智能处理及应用工信部重点实验室副教

授, 主要研究领域包括儿童语言习得, 听  
力损伤儿童语言发展, 实验语音学, 心理  
语言学。系本文通讯作者。

Email: ping. tang@ njust. edu. cn

## 附录 统计数据

统计数据上传至 Open Science Framework 数据共享网站中, 通过下面链接或二维码  
访问。

[https://osf.io/qf5wd/?view\\_only=887c8023cf5743faad9aa164d23a7c84](https://osf.io/qf5wd/?view_only=887c8023cf5743faad9aa164d23a7c84)

