

## 双耳条件下超前声对人分辨滞后声强度的影响\*

高菲 孙心德 张季平\*\*

(脑功能基因组学教育部重点实验室, 上海市脑功能基因组学重点实验室, 华东师范大学生命科学学院, 上海 200062)

**摘要** 在复杂声环境中, 对声音强度的分辨是听觉系统对声音信号精确处理的重要功能之一. 到目前为止, 有关人对声音强度分辨的研究都是在单耳条件下进行的, 然而, 正常条件下人都是利用双耳感知强度和方位变化的声音. 以人对声刺激强度的最小可察觉差异(just noticeable difference, JND)为强度分辨阈值的指标, 观察双耳条件下超前声对人分辨滞后声强度的影响. 实验在封闭声场中进行, 声刺激强度和空间方位的控制是通过改变双耳平均声压(average binaural level, ABL)和双耳声压差(interaural level difference, ILD)来模拟的. 实验结果表明, 与安静条件下人对声刺激强度的分辨阈值相比, 低强度的超前声对人分辨滞后声强度的阈值无显著影响, 而中等及以上强度(ABL 大于或等于 40 dB)的超前声可提高人分辨滞后声强度的阈值, 阈值的提高随超前声强度的增加呈单调增大的趋势. 当超前声强度一定时, 超前声对人分辨滞后声强度的影响随滞后声强度的增加而衰减, 对分辨较高强度的滞后声的阈值影响不显著, 该结果与单耳的研究结果有明显差异. 实验未发现超前声和滞后声 ILD 的相对改变对人探测滞后声强度变化的阈值有显著影响.

**关键词** 前掩蔽, 声音强度分辨, 最小可察觉差异, 双耳平均声压, 双耳声压差

**学科分类号** Q6

**DOI:** 10.3724/SP.J.1206.2010.00494

在自然声环境中, 不同强度的声音信号常来自不同的声源方位并以一定的时间序列出现. 听觉系统对声音信号强度微小变化的分辨能力是听觉系统的重要功能之一, 通常用强度分辨阈值作为衡量听觉系统的强度分辨能力的指标. 已有的研究表明, 超前出现的声音(超前声或前掩蔽声)对后出现的声音(滞后声)的感知有影响, 表现在对滞后声感知阈值的提高<sup>[1-3]</sup>, 这种现象为前掩蔽. 单耳条件下, 高强度的超前噪声可导致人对纯音强度分辨阈值的提高, 被试对纯音强度分辨的阈值随纯音强度的升高而呈非单调性的变化, 即超前噪声对人分辨中等强度纯音的阈值影响较大<sup>[4-6]</sup>. 到目前为止, 有关前掩蔽条件下人对纯音强度分辨阈值的研究都是在单耳条件下进行的, 所用的前掩蔽声为高强度的噪声. 然而, 正常条件下人都是利用双耳感知声音, 声音信息在听觉中枢的处理一般都经过复杂的双耳整合. 此外, 自然环境中的超前声强度也是变化的. 因此, 本研究的目的之一是在双耳条件下测定不同强度的超前声如何影响人对滞后声强度的分辨.

在自然声环境中, 来自一定空间方位的信号声

与其他先后出现的声音的空间方位不一定相同. 因此, 相对于单耳条件, 在双耳条件下研究人对声音强度的分辨能力必须考虑到声源的空间方位. 在人对声源方位分辨的研究中发现, 人对来自正前方声源方位的分辨优于对其他声源方位的分辨<sup>[7]</sup>. 在有背景噪声的条件下, 人对信号声源方位的定位能力随其与背景噪声方位的远离而增强<sup>[8-9]</sup>. 神经生理学实验证明, 听皮层神经元对空间方位有选择性<sup>[10-11]</sup>, 超前声对神经元反应的影响与神经元的空间方位偏好选择性有关<sup>[12-14]</sup>. 那么, 人对声音强度的分辨是否与声源方位有关? 如果将滞后声作为信号声, 超前声作为环境中的其他声音, 超前声和滞后声的相对空间方位的差别是否影响人对声音强度的分辨阈值? 因此, 本研究的目的是之二是观察超前声和滞后声相对空间方位的改变如何影响人对声音

\* 国家自然科学基金资助项目(30970984)和教育部新世纪优秀人才支持计划项目(NCET-07-0298).

\*\* 通讯联系人.

Tel: 021-62232775, E-mail: jpzhang@bio.ecnu.edu.cn

收稿日期: 2010-09-25, 接受日期: 2010-11-03

强度的分辨.

本研究是在虚拟声场中进行的, 采用高频声刺激(6 kHz 纯音)使声源方位改变时双耳时间差的影响基本消除. 声源水平方位和声音强度的改变是通过控制双耳平均声压(average binaural level, ABL)和双耳声压差(interaural level difference, ILD)来模拟的. 双耳平均声压是到达两个单耳声压的平均值, 双耳声压差是到达两个单耳声压的差值. 研究表明, 中等及以上强度的超前声可影响人对滞后声强度分辨的阈值, 影响的程度与超前声和滞后声的强度有关, 但超前声和滞后声相对声源方位的改变对人分辨滞后声的强度无显著影响.

## 1 材料与方 法

### 1.1 被 试

参加实验的被试为华东师范大学的学生志愿者, 共 4 名(GF, HJ, XPP, ZM), 年龄在 25 岁左右. 其中 GF 为本研究的作者之一. 志愿者在选定为被试前, 分别测定其左耳和右耳的听阈, 两耳听力正常的志愿者选为被试. 在正式测定被试对声音强度分辨的实验前, 所有被试均先进行预实验, 熟悉整个实验流程并进行反复练习, 待其对声音强度分辨的反应稳定后进行正式测试.

### 1.2 声音刺激系统

声刺激由心理声学工作站(美国 TDT 公司)产生. 该工作站包括多功能声刺激信号发生器(RX6-A5)、程控衰减器(PA-5)、耳机驱动器(HB-7)、耳机(Sennheiser HD265)等. 声音由声刺激信号发生器产生后, 经程控衰减器控制声音强度, 由耳机驱动器将声音送入耳机. 实验中所用的声音为频率 6 kHz、时程 50 ms、升降时间 5 ms 的纯音. 实验在隔音屏蔽室内进行, 被试通过操作 SykoFizx 软件(美国 TDT 公司)使声刺激系统发出声音, 然后分辨声刺激强度的变化并作出相应反应.

### 1.3 听阈的测量

采用 TDT 公司 SykoFizx 软件中的“Yes-No”方法给予声刺激以测量被试的听阈. 若被试能听到声刺激选择 Yes, 若听不到则选 No. 测量时, 声刺激强度开始为 40 dB SPL(左右耳的声音强度均为 40 dB SPL, 即 ABL 为 40 dB, ILD 为 0 dB). 声音强度的变化采用“2 下 1 上”的方法, 即当被试听到声音并做出连续 2 次正确判断后, 声刺激强度降低 10 dB. 依次降低声刺激强度, 当被试某一

次听不到声音并选“No”后, 声刺激强度提高 10 dB, 即进行强度变化方向的反转, 再次进行判断. 如此反复, 经过 2 次反转后, 若被试连续 2 次判断正确, 则小幅降低声刺激强度(步距改为 2 dB), 当强度达到一定值时, 被试再次听不到声音时选择“No”. 如此反复, 共给予 50 次声刺激. 最初 2 次反转的数据主要用于搜寻被试的大致阈值范围, 在对数据取样时删除该部分数据. 从第 3 次反转开始采集数据并求平均值以得到被试对特定频率纯音的听阈.

### 1.4 声音强度分辨阈值的测量

声音强度的分辨阈值是指被试可以分辨的两个不同强度声音间最小的强度差, 通常用最小可察觉差异(just noticeable difference, JND)为指标. 由于本实验是在超前声存在的条件下测试被试对滞后声的强度分辨能力, 在实验设计时, 每次测试中的声刺激包括两组标准声刺激(standard sound)和一组信号声刺激(signal sound), 让被试听完三组声刺激后做出判断, 找出信号声刺激. 其中每组声刺激都包括一个超前声(Tone 1)和一个滞后声(Tone 2), 见图 1. Tone 1 和 Tone 2 均为频率 6 kHz、时程 50 ms、升降时间 5 ms 的纯音, 两者的延时为 100 ms. 三组声刺激的 Tone 1 强度是固定的, 信号声中 Tone 2 的强度为标准声中 Tone 2 的强度(standard ABL)加一个强度增量( $\Delta$ ABL). 相邻两组声刺激之间的无声间隔为 600 ms. 在声音播放的过程中, 信号声和标准声出现的顺序是随机设定的. 被试听出三组

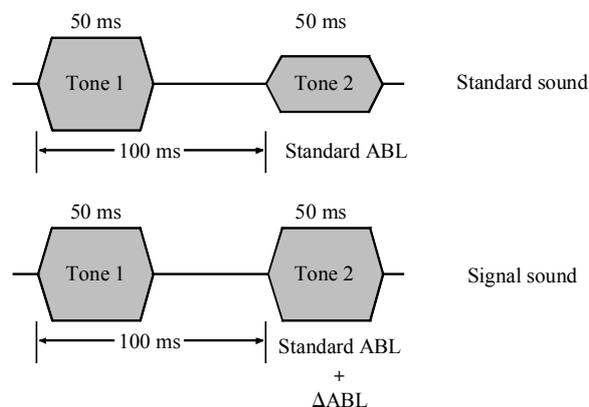


Fig. 1 A schematic illustration of the sound stimuli used in the present study

Both Tone 1 (the preceding sound) and Tone 2 (the successive sound) stimuli were 50 ms in duration with 5 ms rise-fall time. The delay between Tone 1 and Tone 2 was 100 ms. For the standard sound, the levels of Tone 2 were fixed at certain standard ABLs; for the signal sound, the levels of Tone 2 were at standard ABLs plus ABL increments ( $\Delta$ ABL).

声刺激中哪一组声刺激与其他两组不同, 则认为是信号声刺激, 选择相应数字的按钮, 若信号声的强度增量小到被试无法分辨时, 被试随便选择一个按钮. 强度增量的变化采用“2下1上”的方法, 如果被试对某一声音强度增量连续2次选择正确, 则强度增量减小, 如果出现1次选择错误, 则强度增量增大, 这样避免被试没有听出强度增量却误选了正确的按钮. 具体测试时, 最初的强度增量值依据预实验中所测被试的强度 JND 设定. 若预实验中被试的强度 JND 小于 10 dB, 最初的强度增量则设为 10 dB. 若强度 JND 大于 10 dB 时, 最初的强度增量则设为 20 dB. 当被试连续 2 次选择正确后强度增量大幅度下降(步距 2 dB), 当强度增量降到被试的强度分辨阈值之下后, 由于被试选择错误而出现增量变大, 增量方向反转, 出现 2 次反转后, 当被试再次选择正确时, 强度的增量开始小幅度减小(步距为 0.5 dB). 当强度增量再次下降到被试强度分辨阈值之下时, 由于被试选择错误增量又增大, 如此反复, 记录到的强度增量在一个相对稳定的狭小范围上下波动. 当出现 13 次以上的强度增量方向的反转后停止本次测试. 最初的几次反转主要用于搜寻被试的大致阈值范围, 在数据取样时删除该部分数据. 计算最后 10 次反转的数据的平均值, 得到本次测试中被试对一定强度声音的强度分辨阈值(JND). 对每个标准声刺激强度的条件重复 3 次测试.

### 1.5 声刺激条件

本研究包括两部分实验. 在第一部分实验中, 主要观察当 Tone 1 来自正中水平方位、Tone 2 来自不同的水平方位时, Tone 1 的 ABL 对人分辨 Tone 2 ABL 的影响. ILD 为 0 dB 代表声源处于听空间的正中水平方位, 其他 ILD 代表声源远离正中水平方位. 其中 Tone 1 ILD 为 0 dB, ABL 在 0~80 dB 之间变化, 步距为 20, Tone 2 ILD 分别为 0、 $\pm 10$ 、 $\pm 20$  dB, 每个 ILD 条件下的 ABL 均在 20~80 dB 之间变化, 步距为 10 dB. 在第二部分实验中, 主要观察当 Tone 1 来自侧面水平方位、Tone 2 来自正中水平方位时, Tone 1 的 ABL 对人分辨 Tone 2 ABL 的影响. 其中 Tone 1 ILD 为  $\pm 10$  dB, 每个 ILD 条件下的 ABL 在 0~80 dB 之间变化, 步距为 20 dB; Tone 2 ILD 为 0 dB, ABL 在 20~80 dB 之间变化, 步距为 10 dB. 在以上所有测试中, 以 Tone 1 ABL 为 0 dB 时的条件作为接近于安静条件的对照.

### 1.6 数据分析

用 SPSS 13.0 对不同条件下的测试结果进行统计学检验. 本文所有图中平均数据以平均值和标准误( $\bar{x} \pm s$ )表示, 用 repeated measure ANOVA(重复测量的方差分析)对数据进行显著性检验, 当  $P < 0.05$  时认为具有显著性差异.

## 2 结 果

### 2.1 被试的听阈

听阈测量结果表明, 4 位被试的左耳和右耳的听力均正常, 他们对 6 kHz 的纯音听阈都在 6 dB SPL 以下, 在强度分辨阈值的研究中所使用的 6 kHz 纯音信号的强度均高于被试的听阈.

### 2.2 超前声的强度对人分辨滞后声强度阈值的影响

首先观察了当超前声位于正中水平方位(Tone 1 ILD 为 0)时, 超前声强度的改变对人分辨滞后声强度的影响. 当 Tone 1 和 Tone 2 的 ILD 均为 0 dB 时, 随着 Tone 1 ABL 的增大, 被试对 Tone 2 ABL 分辨的 JND 有逐渐增加的趋势, 但对 Tone 2 ABL 分辨阈值的影响随 Tone 2 ABL 的不同而不同. 图 2 第一列小图为每位被试的测试结果(图 2A1~D1)及所有被试的平均测试结果(图 2E1). 从单个被试的数据可以看出, 与对照比较, 当 Tone 1 的 ABL 为 20 dB 时, 其对被试分辨不同 ABL Tone 2 的 JND 影响不明显, 当 Tone 1 的 ABL  $\geq 40$  dB 时, 其对被试分辨较低和中等 ABL Tone 2(Tone 2 ABL 为 20~60 dB)的 JND 有较大的影响, 而对被试分辨较高 ABL Tone 2(Tone 2 ABL 为 70~80 dB)的 JND 影响相对较小. 这样的趋势也在所有被试的平均测试结果中反映出来(图 2E1). 用 Two-way repeated measure ANOVA(双因素重复测量的方差分析)对总体数据统计分析表明, Tone 1 对分辨 Tone 2 ABL 的 JND 影响显著( $F(4, 44) = 159.65, P < 0.001$ ), 当 Tone 1 ABL 为 20 dB 时, 其对被试分辨 Tone 2 ABL 的影响不显著(pairwise comparison(配对比较),  $P > 0.05$ ), 当 Tone 1 ABL  $\geq 40$  dB 时, 其影响随 Tone 1 ABL 的增大而增强(Tone 1 任意两个 ABL 条件下的效应均有显著差异, pairwise comparison,  $P < 0.05$ ), Tone 1 对人分辨 Tone 2 ABL 的 JND 影响随 Tone 2 ABL 的增加逐渐减弱( $F(6, 66) = 142.32, P < 0.001$ ). 我们进一步测定了当 Tone 1 的 ILD 为 0 dB 而 Tone 2 的 ILD 分别为  $\pm 10$  和  $\pm 20$  dB 时, 即 Tone 1 和 Tone 2 的 ILD 不同时, 超前声强度的

改变对人分辨滞后声强度的影响. 图2第1~4排的第2~5列小图分别为不同条件下单个被试的测试结果(图2A2~D5), 第5排的第2~5列小图分别为不同条件下所有被试的平均测试结果(图2E2~E5). 当Tone 1和Tone 2的ILD不同时, 超前声强度的变化对被试分辨滞后声强度JND的影响趋势与当Tone 1和Tone 2的ILD均为0 dB时的测试结果趋势一致(Two-way repeated measure ANOVA, Tone 2 ILD为10 dB时,  $F(4, 44) = 203.28$ ,

$P < 0.001$ ; Tone 2 ILD为-10 dB时,  $F(4, 44) = 187.28$ ,  $P < 0.001$ ; Tone 2 ILD为20 dB时,  $F(4, 44) = 169.74$ ,  $P < 0.001$ ; Tone 2 ILD为-20 dB时,  $F(4, 44) = 152.21$ ,  $P < 0.001$ ). 除了Tone 1 ABL为20 dB条件外, Tone 1对人分辨Tone 2 ABL的JND影响均随Tone 1 ABL的增大而增强(Tone 1任意两个ABL条件下的效应均有显著差异, Pairwise comparison,  $P < 0.05$ ). 在这些Tone 2 ILD条件下, Tone 1对人分辨Tone 2 ABL的JND

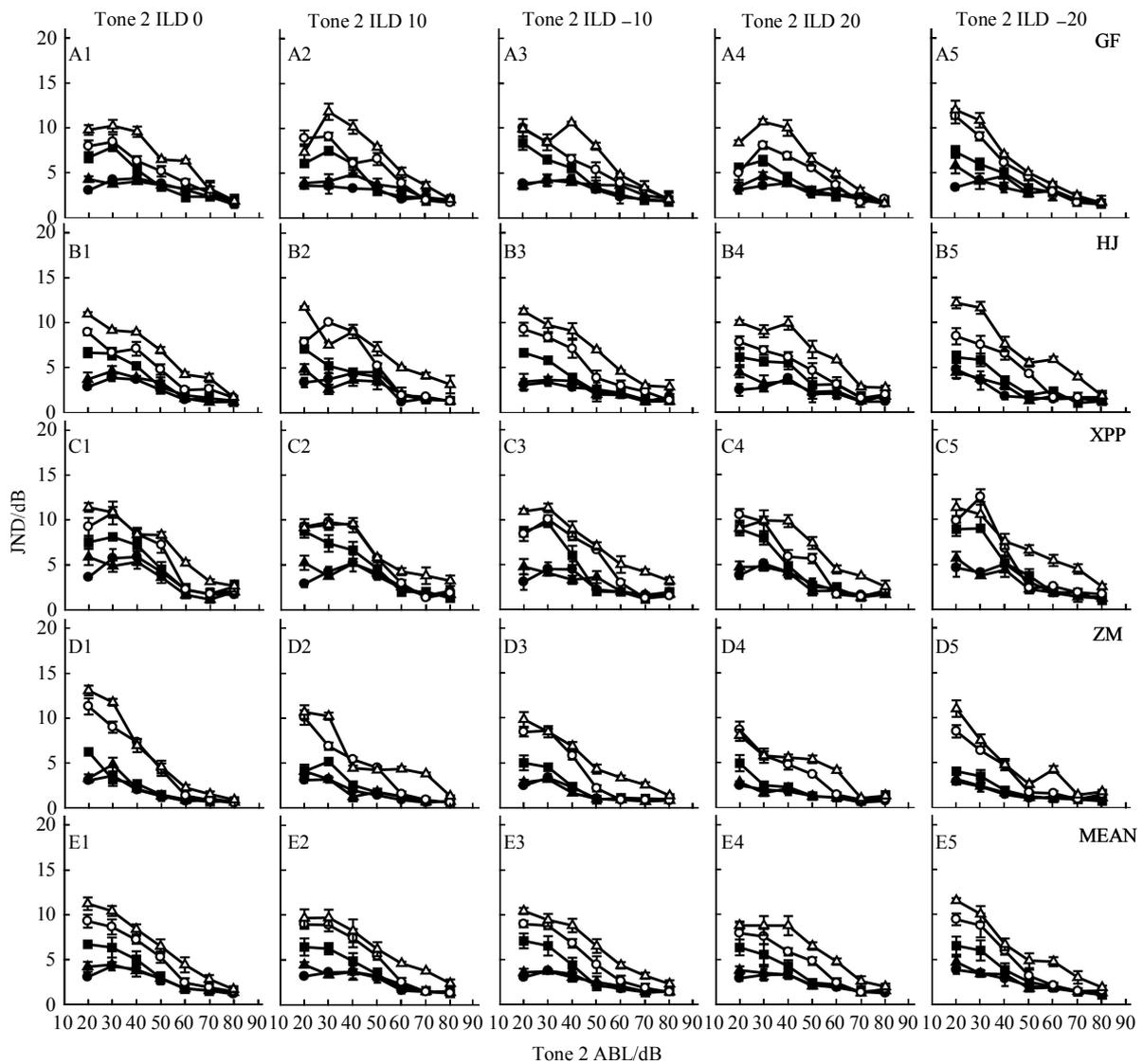


Fig. 2 The discrimination of Tone 2 ABL determined from four subjects at various Tone 1 ABL when Tone 1 ILD was at 0 dB

The ILDs of Tone 2 were varied from -20 to 20 dB in 10 dB steps and are shown on the top of each panels in the first row. The data in each panel from row 1 to row 4 are from one subject. Panels in each column show the JND functions under a Tone 2 ILD condition. The averaged data from four subjects at each Tone 2 ILD condition are shown in each panel in row 5. Different symbols represent various ABLs of Tone 1 at ILD 0 dB. ●—● : 0; ▲—▲ : 20; ■—■ : 40; ○—○ : 60; △—△ : 80.

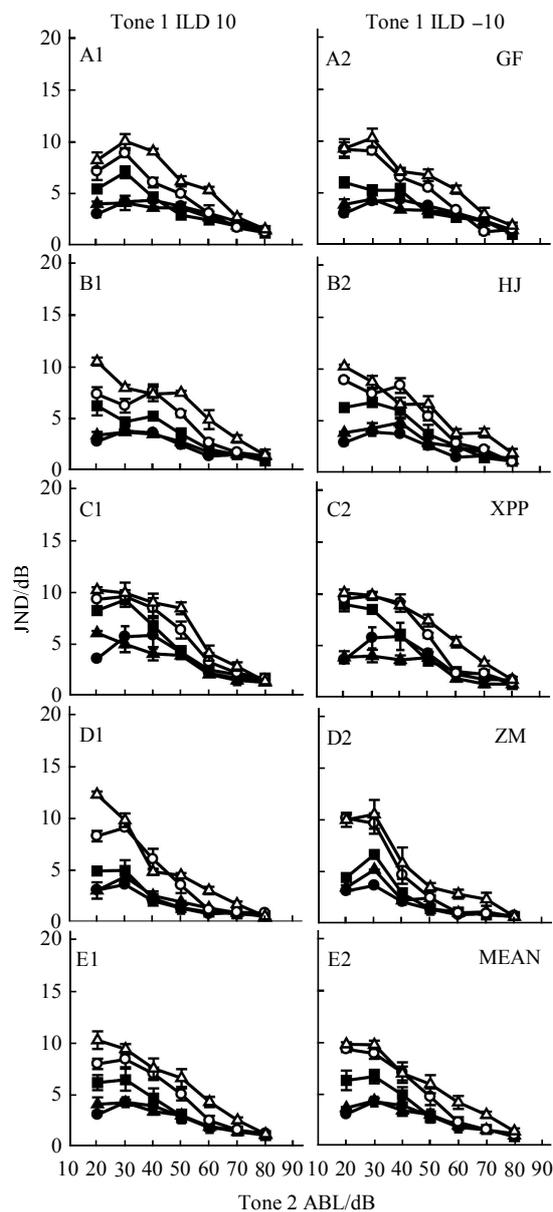
影响随 Tone 2 ABL 的增加有显著减弱趋势 (Two-way repeated measure ANOVA, Tone 2 ILD 为 10 dB 时,  $F(6, 66) = 119.12, P < 0.001$ ; Tone 2 ILD 为 -10 dB 时,  $F(6, 66) = 217.51, P < 0.001$ ; Tone 2 ILD 为 20 dB 时,  $F(6, 66) = 75.80, P < 0.001$ ; Tone 2 ILD 为 -20 dB 时,  $F(6, 66) = 187.72, P < 0.001$ ).

在上面的实验中, 我们研究了当超前声位于被试的正中水平方位时, 超前声对被试分辨滞后声强度的影响, 那么当超前声位于侧面水平方位时, 超前声对被试分辨滞后声强度的影响如何呢? 我们将 Tone 1 的 ILD 设定为 +10 dB 和 -10 dB, 并将 Tone 2 的 ILD 设定为 0 dB, 观察了不同强度的超前声对被试分辨滞后声强度阈值的影响. 图 3 显示了单个被试的测试结果(图 3 中第 1~4 排小图 A1~D2)及所有被试的平均测试结果(图 3E1 和 E2). 用 Two-way repeated measure ANOVA 对图 3 中总体数据的统计分析表明, Tone 1 对人分辨 Tone 2 ABL 的 JND 有显著影响(当 Tone 1 ILD 为 10 dB 时,  $F(4, 44) = 122.17, P < 0.001$ ; 当 Tone 1 ILD 为 -10 dB 时,  $F(4, 44) = 129.83, P < 0.001$ ), 除 Tone 1 ABL 为 20 dB 条件外, Tone 1 对被试分辨 Tone 2 ABL 的 JND 影响均随 Tone 1 ABL 的升高而增大(pairwise comparison 任意两组均有显著差异,  $P < 0.05$ ). Tone 1 对人分辨 Tone 2 ABL 的 JND 影响随 Tone 2 ABL 的增大有显著减弱的趋势(当 Tone 1 ILD 为 10 dB 时,  $F(6, 66) = 135.50, P < 0.001$ ; 当 Tone 1 ILD 为 -10 dB 时,  $F(6, 66) = 159.88, P < 0.001$ ).

### 2.3 超前声和滞后声的相对声源方位对被试分辨滞后声强度阈值的影响

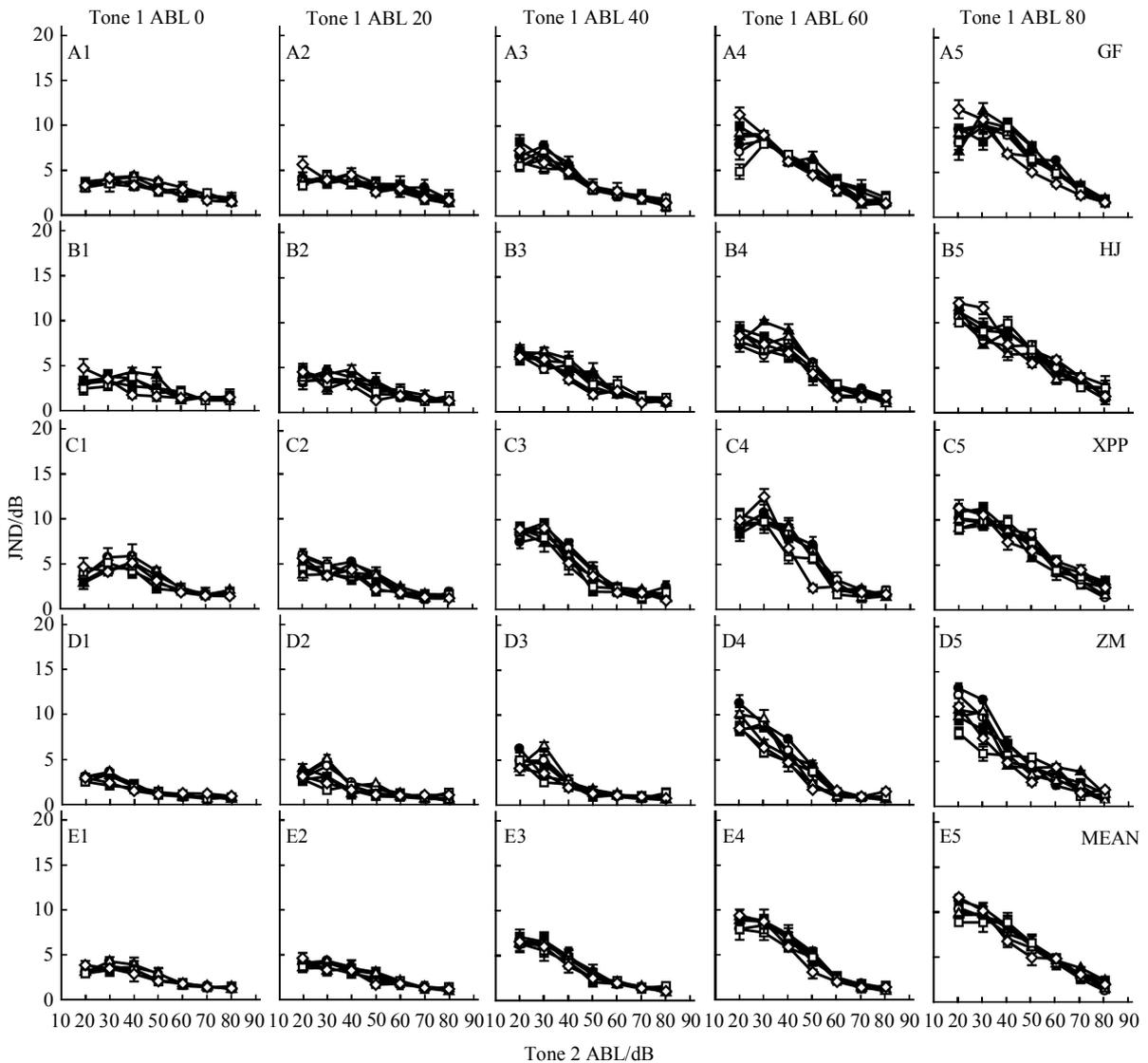
以上实验结果表明, 无论超前声处于被试听空间正中水平方位还是侧面水平方位, 超前声对人分辨滞后声强度影响的趋势是一致的. 为了研究超前声和滞后声的相对声源方位是否对人分辨滞后声强度的阈值产生影响, 我们将上述实验数据按超前声和滞后声的不同 ILD 组合作图并进行分析, 结果见图 4. 可以看出, 当 Tone 1 ABL 一定时(图 4 中每列小图), 不论 Tone 1 和 Tone 2 的 ILD 之差为 0、10 还是 20 dB, 被试分辨 Tone 2 ABL 的 JND 曲线几乎重叠在一起. 这可以从单个被试的数据(前 4 排的小图)以及总体平均数据(最后 1 排小图)中看出来. 尽管个别被试(被试 GF 和 ZM)的数据

在 Tone 1 ABL 为 60 和 80 dB 条件下有一定波动, 用 Two-way repeated measure ANOVA 对不同 ABL 的 Tone 1 条件下的总体数据分析发现, Tone 1 和 Tone 2 ILD 的相对改变对人分辨 Tone 2 ABL 的 JND 无显著影响( $P > 0.05$ ).



**Fig. 3 The discrimination of Tone 2 ABL determined from four subjects at various Tone 1 ABL when Tone 1 ILD was at  $\pm 10$  dB and Tone 2 ILD was at 0 dB**

The data in each panel from row 1 to row 4 are from one subject. The data in the bottom row in each panel show the averaged data of four subjects. The data in each column were collected under the same Tone 1 ILD condition shown on the top of each panels in the first row. Different symbols represent various ABLs of Tone 1 when Tone 2 ILD was at 0 dB. ●—●: 0; ▲—▲: 20; ■—■: 40; ○—○: 60; △—△: 80.



**Fig. 4 The effects of the different pairs of Tone 1 ILD and Tone 2 ILD on the ABL discrimination threshold (JND) of Tone 2**

The data in each panel from row 1 to row 4 are from one subject. The data in each panel in the bottom row show the averaged data of four subjects. The data in each column were collected under the same Tone 1 ABL condition shown on the top of each panel in the first row. Different symbols represent conditions at various pairs of Tone 1 ILD and Tone 2 ILD in dB. ●—●: 0/0; ▲—▲: 0/10; ■—■: 0/-10; ○—○: 10/0; △—△: -10/0; □—□: 0/20; ◇—◇: 0/-20.

### 3 讨 论

#### 3.1 超前声的强度对人分辨滞后声强度的影响

在自然的声环境中, 声音常以一定的序列出现. 在一定条件下, 超前声影响人对滞后声的感知, 这种影响与超前声和滞后声的强度有关. 本研究测试了不同强度的超前声对人分辨滞后声强度的

影响, 结果发现, 与安静条件下的结果相比, 较低强度的超前声(Tone 1 ABL 为 20 dB)对被试分辨滞后声强度的阈值无显著影响. 但随着超前声强度的提高, 超前声对被试分辨滞后声强度的阈值的影响逐渐增大. 对猴<sup>[15]</sup>和小鼠<sup>[16]</sup>下丘神经元的研究表明, 超前声刺激可提高下丘神经元对滞后声反应的阈值. 随着超前声强度的增加, 猴下丘神经元对滞

后声反应的阈值逐渐升高, 无论下丘神经元对超前声的反应出现饱和或呈非单调反应模式, 超前声对滞后声阈值影响的这种趋势始终存在<sup>[15]</sup>. 这些发现为本研究的结果提供了可能的神经机制. 我们推测, 在较低强度的超前声条件下, 神经元对滞后声反应的阈值受影响较小, 因此超前声对参与强度分辨的神经元的总体数量影响不大; 但在超前声强度逐步增加时, 神经元对滞后声反应的阈值逐渐提高, 参与强度分辨的神经元的群体数量逐渐减少, 从而导致了人对滞后声强度的分辨阈值随超前声强度的增加而逐步提高. 本研究还发现, 在超前声强度一定时, 超前声对人分辨滞后声强度的影响随滞后声强度的增加而减小. 在大鼠听皮层的研究表明, 听神经元对低强度声刺激的反应比对高强度声刺激的反应受超前声的抑制性影响更强<sup>[17]</sup>. 由此可推测, 当超前声出现时, 人脑中听神经元对较低强度的滞后声反应受的抑制较强, 而对较高强度的滞后声反应受超前声的抑制较弱. 因此, 在超前声存在时, 其对分辨声音强度的阈值的影响在滞后声强度较低时相对较大、在滞后声强度较高时较小.

单耳条件下的研究表明<sup>[4-5]</sup>, 高强度的窄带噪声可使人对纯音强度的分辨阈值提高, 但该影响呈非单调的趋势, 即在分辨中等强度的纯音(40~60 dB SPL)时影响最大, 该现象称为“midlevel hump”. 本研究发现, 在双耳条件下得到的结果与单耳条件下的结果相比有明显差异, 当 Tone 1 ABL 为 80 dB 时, 被试对低强度(ABL 20~30 dB) Tone 2 的强度分辨阈值高于对中等和高强度 Tone 2 的强度分辨阈值, 除个别条件外, 在绝大多数条件下并未发现超前声对人分辨滞后声强度阈值的非单调影响, 相反, 超前声对人分辨滞后声强度的影响随滞后声强度的增加呈非常明显的单调减小的趋势. 双耳和单耳条件下的实验结果的差异提示, 脑对双耳听觉信息整合后对强度信息的处理很可能与单耳条件下的处理有显著差别.

### 3.2 超前声和滞后声 ILD 的差异对人分辨滞后声强度的影响

通过改变 ILD 模拟声源水平方位的改变, 我们并未发现人对声刺激强度变化的分辨阈值随声源方位有显著改变. 在序列声条件下, 也未发现超前声和滞后声的声源方位相对改变对人探测滞后声强度变化的阈值有显著影响. 因此, 超前声和滞后声的相对水平方位并不是影响人对滞后声强度分辨阈值的重要因素. 与之形成反差的是, 在声源定位的

研究中发现, 人对来自正前方的声音信号的方位分辨能力比对来自侧面方位的强<sup>[7]</sup>, 在猫上也发现了类似的行为表现<sup>[18-19]</sup>. 在持续背景噪声条件下, 当背景噪声的声源方位和目标声信号的声源方位一致时, 噪声对人探测目标声信号的阈值影响最大<sup>[9]</sup>, 这也在神经生理学的研究中得到证实<sup>[14]</sup>. 在超前声条件下, 来自神经元偏好方位和强度的超前声刺激对神经元反应的抑制较强, 而来自其他方位和强度的超前声刺激对神经元反应的抑制相对较弱<sup>[12-13]</sup>. 本研究中, 超前声和滞后声的方位差异的变化对人探测滞后声强度变化的阈值无显著影响, 这与人对声源方位变化的探测表现不一样, 该结果提示人对声刺激强度变化的探测和对声源方位变化的探测机理存在差异.

### 3.3 影响人分辨声音强度变化的其他因素

人对声音强度变化的探测阈值是人声音强度分辨能力的重要指标. 背景噪声可影响人对信号声强度变化的探测. 已有的研究表明<sup>[20]</sup>, 在信号声强度较低时, 背景噪声显著提高人对信号声强度变化的探测阈值. 而在信号声强度较高时, 背景噪声对信号声强度变化的探测阈值无显著影响. 此外, 背景噪声的频谱范围也是重要的影响因素. 在序列声条件下, 超前声和滞后声特性的改变、超前声和滞后声的时间间隔的变化等都会影响人对滞后声强度变化的探测. 单耳上的研究表明, 当超前噪声的频率范围远离滞后声的频率时, 超前噪声对人探测滞后声强度变化的影响大大减弱<sup>[4]</sup>. 在神经电生理实验中也发现了相似的趋势<sup>[15, 21]</sup>, 即当超前声和滞后声的频率相近或相同时, 超前声对神经元反应的抑制较强. 此外, 超前声和滞后声之间的时间间隔也是影响人精确感知和分辨滞后声的重要因素之一. 在序列声条件下, 随着超前声和滞后声时间间隔的延长, 人分辨滞后声强度变化的阈值逐渐减小<sup>[5]</sup>. 本研究中超前声和滞后声的频率、以及两者之间的时间间隔是固定的, 我们推测双耳条件下超前声的频率、超前声和滞后声之间的时间间隔对人分辨滞后声强度的影响趋势与单耳条件下的趋势可能相似.

### 参 考 文 献

- [1] Carlyon R P. The development and decline of forward masking. *Hear Res*, 1988, **32**(1): 65-79
- [2] Jesteadt W, Bacon S P, Lehman J R. Forward masking as a function of frequency, masker level, and signal delay. *J Acoust Soc Am*, 1982, **71**(4): 950-962

- [3] Moore B C. Psychophysical tuning curves measured in simultaneous and forward masking. *J Acoust Soc Am*, 1978, **63**(2): 524-532
- [4] Zeng F G, Turner C W. Intensity discrimination in forward masking. *J Acoust Soc Am*, 1992, **92**(2 Pt 1): 782-787
- [5] Zeng F G, Turner C W, Relkin E M. Recovery from prior stimulation. II : Effects upon intensity discrimination. *Hear Res*, 1991, **55**(2): 223-230
- [6] Stellmack M A, Viemeister N F, Byrne A J. Forward-masked monaural and interaural intensity discrimination. *J Acoust Soc Am*, 2007, **122**(3): 1328
- [7] Perrott D R. Concurrent minimum audible angle: a re-examination of the concept of auditory spatial acuity. *J Acoust Soc Am*, 1984, **75**(4): 1201-1206
- [8] Terhune J M, Turnbull S D. Masked threshold changes associated with angular separation of noise and signal sources. *Scand Audiol*, 1989, **18**(2): 85-89
- [9] Saberi K, Dostal L, Sadralodabai T, *et al.* Free-field release from masking. *J Acoust Soc Am*, 1991, **90**(3): 1355-1370
- [10] Brugge J F, Reale R A, Hind J E. The structure of spatial receptive fields of neurons in primary auditory cortex of the cat. *J Neurosci*, 1996, **16**(14): 4420-4437
- [11] Imig T J, Irons W A, Samson F R. Single-unit selectivity to azimuthal direction and sound pressure level of noise bursts in cat high-frequency primary auditory cortex. *J Neurophysiol*, 1990, **63**(6): 1448-1466
- [12] Reale R A, Brugge J F. Directional sensitivity of neurons in the primary auditory (AI) cortex of the cat to successive sounds ordered in time and space. *J Neurophysiol*, 2000, **84**(1): 435-450
- [13] Zhang J, Nakamoto K T, Kitzes L M. Modulation of level response areas and stimulus selectivity of neurons in cat primary auditory cortex. *J Neurophysiol*, 2005, **94**(4): 2263-2274
- [14] Furukawa S, Middlebrooks J C. Sensitivity of auditory cortical neurons to locations of signals and competing noise sources. *J Neurophysiol*, 2001, **86**(1): 226-240
- [15] Nelson P C, Smith Z M, Young E D. Wide-dynamic-range forward suppression in marmoset inferior colliculus neurons is generated centrally and accounts for perceptual masking. *J Neurosci*, 2009, **29**(8): 2553-2562
- [16] Wang X, Jen P H, Wu F J, *et al.* Preceding weak noise sharpens the frequency tuning and elevates the response threshold of the mouse inferior collicular neurons through GABAergic inhibition. *Brain Res*, 2007, **1167**: 80-91
- [17] Scholl B, Gao X, Wehr M. Level dependence of contextual modulation in auditory cortex. *J Neurophysiol*, 2008, **99**(4): 1616-1627
- [18] Heffner R S, Heffner H E. Sound localization acuity in the cat: effect of azimuth, signal duration, and test procedure. *Hear Res*, 1988, **36**(2-3): 221-232
- [19] May B J, Huang A Y. Sound orientation behavior in cats. I . Localization of broadband noise. *J Acoust Soc Am*, 1996, **100**(2 Pt 1): 1059-1069
- [20] Jesteadt W, Schairer K S, Nizami L, *et al.* Effects of external noise on detection of intensity increments. *J Acoust Soc Am*, 2009, **126**(4): 1941-1953
- [21] Peng Y, Sun X, Zhang J. Contextual modulation of frequency tuning of neurons in the rat auditory cortex. *Neuroscience*, 2010, **169**(3): 1403-1413

## The Effect of a Preceding Sound on The Level Discrimination of a Successive Sound in Binaural Conditions\*

GAO Fei, SUN Xin-De, ZHANG Ji-Ping\*\*

(Key Laboratory of Brain Functional Genomics, Ministry of Education, Shanghai Key Laboratory of Brain Functional Genomics, School of Life Science, East China Normal University, Shanghai 200062, China)

**Abstract** In a complex acoustical environment, the ability to discriminate the level of a sound is an important function of auditory system to accurately process sound signal information. Previous studies regarding human sound level discrimination were investigated in monaural condition. However, in natural acoustical environments, human discriminate sound level and spatial information binaurally. The effect of a preceding sound was determined upon the level discrimination of a successive sound by measuring the just noticeable difference (JND) of the level of the successive sound in binaural conditions. The data were collected in close-field, dichotic acoustical conditions. The level and the spatial azimuth of both the preceding and the successive sounds were manipulated by changing the average binaural level (ABL) and the interaural level difference (ILD) of the sounds. Compared with the JND of level in quiet, low level preceding sound did not significantly change the JND of the successive sound. However, moderate and high levels (ABL  $\geq 40$  dB) of preceding sound significantly increased the JND of the level of the successive sound. The JNDs were monotonically increased with increasing level of the preceding sound. When the preceding sound level was constant, the effect of preceding sound on the level discrimination of the successive sound was decreased with increasing level of the successive sound, and the effect was not significant when the level of the successive sound was high. These results were different from the previous findings in monaural conditions. Also, the present study did not found a significant effect of ILD difference between the preceding and the successive sound on the level discrimination of the successive sound.

**Key words** forward masking, level discrimination, just noticeable difference, average binaural level, interaural level difference

**DOI:** 10.3724/SP.J.1206.2010.00494

---

\*This work was supported by grants from The National Natural Science Foundation of China (30970984), and The New Century Excellent Talents in University of State Education Ministry of China (NCET-07-0298).

\*\*Corresponding author.

Tel: 86-21-62232775, E-mail: jpzhang@bio.ecnu.edu.cn

Received: September 25, 2010 Accepted: November 3, 2010