

弱背景噪声对大鼠听皮层神经元频率调谐的影响*

彭垠婷 蒲 青 孙心德 张季平**

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

摘要 在自然环境中, 人和动物常在一定的背景噪声下感知信号声刺激, 然而, 关于低强度的弱背景噪声如何影响听皮层神经元对声刺激频率的编码尚不清楚. 本研究以大鼠听皮层神经元的频率反应域为研究对象, 测定了阈下背景噪声对 79 个神经元频率反应域的影响. 结果表明, 弱背景噪声对大鼠初级听皮层神经元的听反应既有抑制性影响、又有易化性影响; 一般来说, 抑制性影响使神经元的频率调谐范围和最佳频率反应域缩小, 易化性影响使神经元的频率调谐范围和最佳频率反应域增大. 对于少数神经元, 弱背景噪声并未显著改变其频率调谐范围, 但却改变了其最佳频率反应域范围. 弱背景噪声对 63.64% 神经元的特征频率和 55.84% 神经元的最低阈值无显著影响. 神经元频率调谐曲线的尖部比中部更容易受到弱背景噪声的影响. 该研究结果有助于我们进一步理解复杂声环境下大脑听皮层对听觉信息的编码机制.

关键词 背景噪声, 频率调谐, 听皮层, 频率反应域, 特征频率

学科分类号 Q6, R338

在自然环境中, 人和动物总在动态多变的声环境中探测、分辨和定位对自己有意义的听觉信息, 进而做出相应的行为反应. 在这个过程中, 需要听觉系统从背景声中提取听觉信息并对其进行准确编码. 噪声是自然环境中最常见的背景声, 几乎无处不在. 因此研究噪声环境下脑对听觉信息的处理有助于我们理解在复杂的声环境下听觉系统处理声信息的机制. 关于噪声环境对听觉信息处理影响的研究, 主要有两大类: 一类研究聚焦于发育过程中的噪声环境如何影响人和动物在成年时的听觉行为^[1]、以及如何影响在成年时听觉中枢对声刺激参数(如频率、强度、空间等)的编码^[2-5]; 另一类研究聚焦于背景噪声如何影响听觉系统对声刺激信号的即时编码, 如背景噪声对听神经处理声信息的影响^[6, 7]、以及背景噪声对下丘^[8]和听皮层^[9]神经元编码声刺激强度的影响. 在听皮层的研究表明, 背景噪声能使听皮层神经元的听空间感受野缩小, 但神经元的空间敏感性的信息仍被保留^[10]. 这些研究中的大多数关注于中等强度及高强度噪声的影响. 在自然环境中, 低强度的弱背景噪声经常与信号声相伴, 但弱背景噪声如何影响听觉中枢神经元对信号声的处理并未得到足够重视. 有研究表明, 弱背景噪声能提高人的听觉敏感性^[11, 12], 然而与之相关的中枢神经机制鲜见报道. 在噪声环境中, 听觉系统对声刺激信号的信息提取依赖于其对信号声刺激的频率、强度、时间、方位信息的编码. 在对听觉中枢神经元频率调谐的研究中发现, 弱噪声对小鼠下丘大多数神经元的听反应有掩蔽效应, 弱噪声使下丘神经元的频率调谐曲线锐化、反应阈值提高, 并且 GABA 能抑制参与了该掩蔽效应^[13-16]. 听皮层是听觉系统上行通路的最高中枢, 然而, 到目前为止, 关于背景噪声尤其是弱背景噪声如何影响听皮层神经元对声刺激频率的编码尚不清楚. 因此, 本研究的主要目的是, 以神经元的频率反应域为研究对象, 在大鼠听皮层观察弱背景噪声对听神经元编码声刺激频率的影响, 为进一步了解在复杂声环境下听皮层对

*国家自然科学基金项目(NSFC No.30970984), 上海市脑功能基因组学重点实验室及脑功能基因组学教育部重点实验室(华东师范大学)开放课题基金.

**通讯联系人.

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

收稿日期: 2012-03-06, 接受日期: 2012-05-10

听觉信息的处理机制提供实验依据.

1 材料与方法

1.1 实验动物及手术

实验在 44 只成年 Sprague-Dawley 大鼠上进行, 体重 200~300g, 雌雄不拘, 购于上海实验动物有限公司, 清洁级. 用戊巴比妥钠 (sodium pentobarbital, 40mg/kg 体重) 腹腔麻醉大鼠后, 给大鼠皮下注射阿托品 (atropine sulfate), 0.07mg/kg 体重) 防止气管产生分泌物. 在盐酸普鲁卡因局部麻醉下, 行气管插管术. 切开动物头部正中皮肤, 暴露颅骨并清除结缔组织, 用 502 胶水和牙科水泥将一根长 2 cm 的铁钉粘固于颅骨上, 以备固定大鼠头部. 在左侧颞骨开一小孔, 暴露听皮层所在区域, 除去硬脑膜, 暴露初级听皮层以备插入记录电极. 将大鼠移于实验台架上, 调整其头部位置, 保持耳廓位置与自然状态一致, 然后通过头部铁钉将大鼠头部固定在防震台架上. 由温度控制仪 (BME-461 型) 监控大鼠体温, 并通过一个小型电热毯加热将大鼠体温维持在 37.5℃ 左右. 实验过程中通过微注射泵缓慢向腹腔注射戊巴比妥钠以维持其麻醉状态.

1.2 声刺激系统

实验采用自由声场刺激方式, 声刺激由听觉神经生理工作站 (TDT 公司, 美国) 产生. 该系统由计算机和声处理器控制并产生数字声信号, 声音的强度、频率、时间参数等由计算机控制并调节. 高频喇叭位于动物头部前方记录电极对侧空间 (水平方位 45 度, 垂直方位 0 度) 的自由声场, 距动物耳部正中线 20 厘米, 实验前用 0.25 英寸的麦克风和校正系统 (ACO 公司) 由计算机对进入动物耳的声音进行校正并保存. 实验时由计算机控制声刺激软件并根据校正结果和实验设计送出相应的声刺激. 声刺激强度以 dB SPL 表示 (参照于 20 μ P). 声刺激的时程为 50 毫秒、升降时间为 5 毫秒. 实验中所用的声刺激包括纯音和宽带白噪声. 宽带白噪声的频谱范围为 4.0~44.0kHz. 在安静条件下用纯音测定神经元的频率反应域. 研究背景噪声对神经元频率反应域的影响时, 宽带白噪声和纯音同时给予. 在每个声刺激条件下给予 20 次声刺激, 相邻两次声刺激之间的时间间隔为 800 毫秒.

1.3 记录系统

记录电极为玻璃微电极, 阻抗为 2.0~5.0 兆欧. 由 SM-21 微电极操纵仪 (Narishige, 日本) 将记录电极垂直插入听皮层, 记录听皮层单个神经元对声刺激的反应. 微电极插入的深度可在屏蔽室外由微电极操纵仪控制. 电信号经前置放大器 (DAM-80, 美国 WPI 公司) 放大 (X1000)、滤波 (0.3~6.0 kHz), 然后送到示波器 (TDS2024) 和 TDT 听觉神经生理工作站进行显示和处理, 同时送入监听系统. TDT 神经生理工作站通过 OpenEX 软件对该电信号进行分辨、处理.

1.4 神经元的频率反应域的测定

在初级听皮层记录神经元的听反应, 初级听皮层的确定是依据音调架构^[17]和听神经元反应的短潜伏期为特征进行的. 在听皮层找到反应稳定的听神经元后, 测定神经元对宽带白噪声的强度反应曲线 (强度为 0~80 dB SPL, 步长为 10 dB), 将强度反应曲线上最大反应的 20% 对应的噪声强度设定为该神经元对宽带白噪声反应的阈值. 用视听法测定该神经元对声刺激频率和强度的大致反应范围, 然后给予一个比视听法测得的频率和强度范围稍大的声刺激频率-强度联合矩阵 (声刺激频率变化步长为 1kHz、强度的变化步长为 10 dB), 记录神经元在安静条件下的频率强度反应域, 在每个频率强度联合下给予 20 次声刺激, 相邻两次声刺激之间的时间间隔为 800 毫秒. 然后在神经元阈下 10 dB 的白噪声背景下记录神经元对纯音刺激的频率反应域. 频率反应域的记录结束后, 再次记录神经元对白噪声反应的强度曲线, 并与对照强度曲线进行比较. 若强度反应曲线上的取样点的放电数差异大于 20%, 则认为神经元反应不稳定, 在数据分析时将该神经元剔除.

1.5 数据分析

使用 TDT 系统的 OpenExplore 软件分析神经元对不同声刺激反应的放电数, 绘制神经元的频率反应域(frequency response area, FRA). 定义神经元放电数为最大放电数 20% 的频率反应域区域边界为神经元频率调谐曲线(frequency tuning curve, FTC), 并据此得到神经元的特征频率(characteristic frequency, CF)、最低阈值(minimum threshold, MT)、频率调谐曲线的 Q_{ndB} 值. Q_{ndB} 值为神经元的特征频率除以最低阈值以上 ndB 的频率调谐曲线的宽度. 定义神经元频率反应域中放电数大于最大放电数 80% 的区域为神经元偏好的频率-强度联合, 该区域为神经元的最佳频率反应域. 比较并分析神经元在安静条件下和在弱背景噪声下的 CF、MT、FTC 范围、最佳频率反应域的变化.

2 结果

在大鼠听皮层上研究了 79 个神经元在安静条件下和在弱背景噪声下的频率反应域, 取样神经元的特征频率分布于 4.0-23.0 kHz 之间, 对宽带噪声反应的最低阈值分布于 25.0-60.0 dB SPL 之间. 神经元单独对阈下 10 dB 的宽带噪声无听反应.

2.1 弱背景噪声对听皮层神经元频率反应域的影响

弱背景噪声对听皮层神经元频率反应域中的听反应的影响可分为三类: 易化性影响, 抑制性影响, 无显著影响. 将安静条件下和在弱背景噪声条件下测得的每个神经元的频率反应域中的听反应进行配对 t 检验(paired-sample t test), 结果发现, 在研究的 79 个神经元中, 弱背景噪声使 26 个(32.91%)神经元频率反应域中的听反应显著增加($p < 0.05$), 表现为易化性影响, 使 18 个(22.78%)神经元频率反应域中的听反应显著减少($p < 0.05$), 表现为抑制性影响. 弱背景噪声对 35 个(44.31%)神经元频率反应域中的听反应无显著影响($p > 0.05$). 图 1 显示的是弱背景噪声对三个代表性神经元频率反应域的影响. 图中频率反应域的边界(最浅的灰色外边界, 反应域中最大放电数的 20%)定义为神经元的频率调谐曲线, 代表神经元频率调谐的阈值范围. 图中黑色区域为反应域中放电数大于或等于最大放电数 80% 的区域, 定义为神经元最佳频率反应域, 代表其偏好的频率-强度联合范围. 弱背景噪声使神经元 A 的频率反应域中的听反应显著增加(paired-sample t test, $df=62$, $t=6.107$, $p < 0.05$), 频率调谐阈值范围增大、并使其最佳频率反应域增大(Fig. 1A-1 与 A-2 对比), 使神经元 B 频率反应域中的听反应显著减少(paired-sample t test, $df=104$, $t=3.448$, $p < 0.05$), 频率调谐阈值范围缩小、以及最佳频率反应域缩小(Fig. 1B-1 与 B-2 对比). 弱背景噪声并未显著改变神经元 C 频率反应域中的平均听反应(paired-sample t test, $df=90$, $t=1.447$, $p > 0.05$)及频率调谐曲线的范围, 但使其最佳频率反应域范围的减小(Fig. 1C-1 与 C-2 对比).

弱背景噪声对群体神经元频率调谐曲线以及最佳频率反应域的影响见 Fig. 2, 可见, 背景噪声对大多数神经元的频率调谐范围产生了影响(Fig. 2A 和 B). 以频率调谐曲线区域的面积(FTC area)变化大于 20% 为显著变化标准, 结果显示, 弱背景噪声使 32.91% 的神经元的频率调谐阈值范围显著增大, 使 22.78% 的神经元的频率调谐阈值范围显著缩小, 但对 44.31% 的神经元的频率调谐阈值范围无显著影响(Fig. 2C). 定义神经元最佳频率反应域面积(Best FRA area)变化大于 20% 为显著变化标准, 结果发现, 弱背景噪声使 46.84% 的神经元的最佳频率反应域显著增大, 使 35.44% 神经元的最佳频率反应域显著缩小, 对 17.72% 的神经元的最佳频率反应域无显著影响(Fig. 2C). 进一步的分析发现, 背景噪声对 26.59% 的神经元频率调谐曲线范围无显著影响, 但却对这些神经元的最佳频率反应域有显著影响.

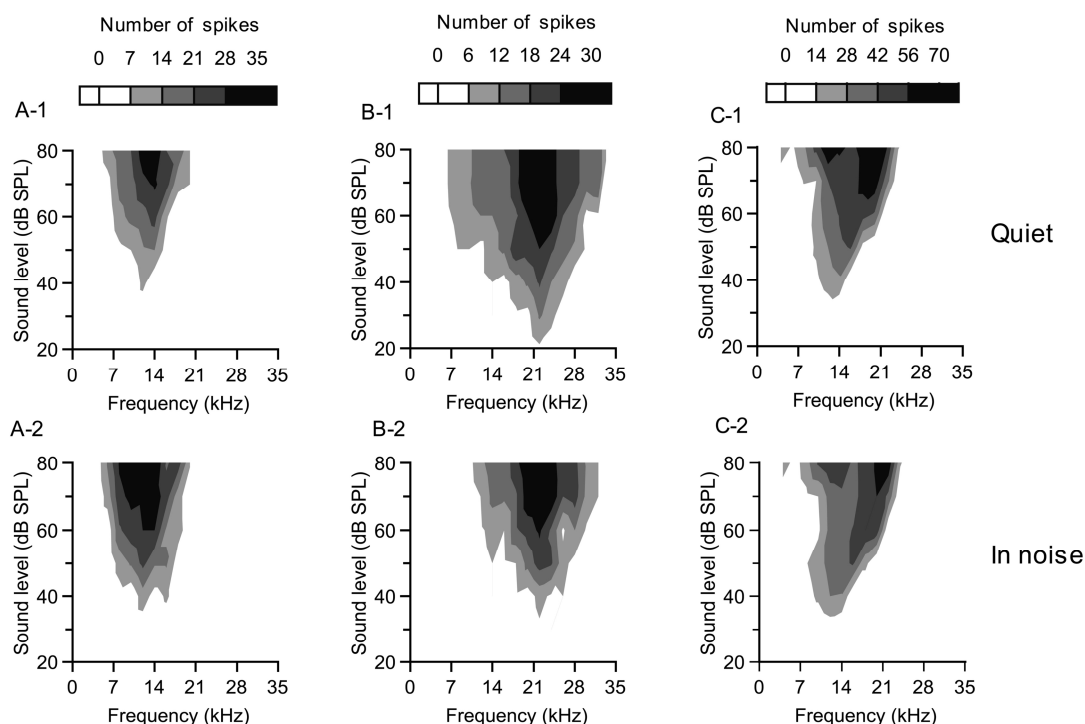


Fig. 1 The effect of weak background noise on frequency response area (FRA) of three representative neurons in the rat auditory cortex

Panels in each column illustrate the data from one neuron. Panels on the top row show the FRA data determined in quiet conditions, and panels on the bottom row show the FRA data determined in weak background noise conditions. Weak background noise enlarged the FRA of neuron A (left column) and reduced the FRA of neuron B (middle column). Background noise did not change the extent of frequency tuning of neuron C (right column) but reduced the auditory responses to its preferred frequency and level within FRA.

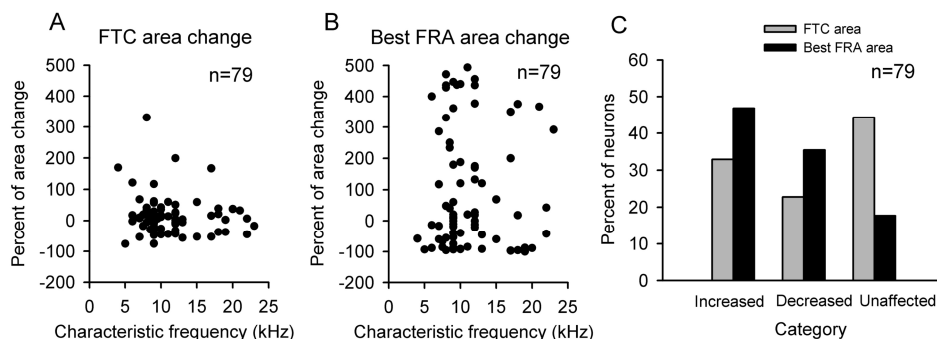


Fig. 2 Population data showing the effect of weak background noise on the extent of frequency tuning curves (FTCs) and the best frequency response areas (best FRAs) of 79 sampled neurons

A: Each filled circle in panel A or panel B shows the percent of area change of FTC (panel A) or the percent of area change of the best FRA (panel B) of one neuron by weak background noise. Panel C illustrates the percentage of neurons that showing different effects on FTC area and the best FRA area by weak background noise.

2.2 弱背景噪声对听皮层神经元特征频率和最低阈值的影响

根据在安静条件下和在弱背景噪声条件下测得的神元的频率调谐曲线, 测量背景噪声对听皮层神经元特征频率 (CF) 和最低阈值 (MT) 的影响 (Fig. 3). 以神经元特征频率的变化大于 1 kHz 为显著变化标准, 在给予阈下 10 dB 的弱背景噪声后, 63.64% 的神元的特征频率未发生明显变化, 18.18% 的神元的特征频率升高, 18.18% 的神元的特征频率降低 (Fig. 3A). 可见, 弱背景噪声只对少数神经元的特征频率产生了显著影响. 以神经元最低阈值的改变大于 5.0 dB 为显著变化标准, 在阈下 10 dB 的背景噪声条件下, 有 55.84% 的神元的最低阈值未发生显著变化, 12.99% 的神元的最低阈值有显著提高, 29.87% 神元的最低阈值

有显著降低 (Fig. 3B)。

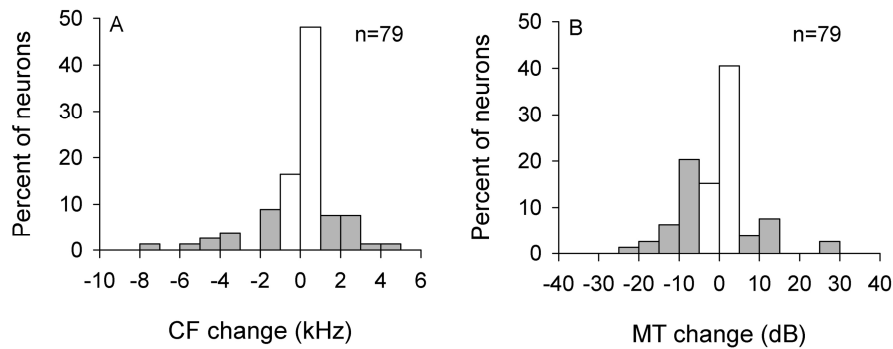


Fig. 3 Population data showing the effect of weak background noise on the characteristic frequency (CF) and the minimum threshold (MT) of 79 neurons in the auditory cortex

Panel A: the unfilled bar shows non-significant CF change (i.e., the CF change was within ± 1 kHz), and the grey bar shows significant CF change. Panel B: the unfilled bar shown non-significant MT change (i.e., the MT change was within ± 5 dB), and the grey bar shows significant MT change.

2.3 弱背景噪声对听皮层神经元频率调谐曲线的 Q 值的影响

测量神经元最低阈值以上 10、20、30dB 的频率调谐曲线的带宽, 用神经元的特征频率除以带宽即得到 Q_{10dB} , Q_{20dB} , Q_{30dB} 的值, 以此衡量神经元对特征频率的选择性. Q 值越大, 神经元对特征频率的选择性越高. 神经元在安静条件和弱背景噪声条件下的 Q 值分布见 Fig. 4, 可见弱背景噪声对听神经元频率调谐曲线的 Q 值的影响随神经元不同而不同 (Fig. 4A, B, C). 以 Q 值的变化大于 20% 为显著变化标准, 则可将弱背景噪声对 Q 值的影响划分为三类: 使 Q 值增大、减小和无显著影响. 总体而言, Q_{10dB} 和 Q_{20dB} 值受影响的神经元所占的比例比 Q_{30dB} 值受影响的神经元所占的比例高 (Fig. 4D), 这提示神经元频率调谐曲线的尖部更容易受到弱背景噪声的影响.

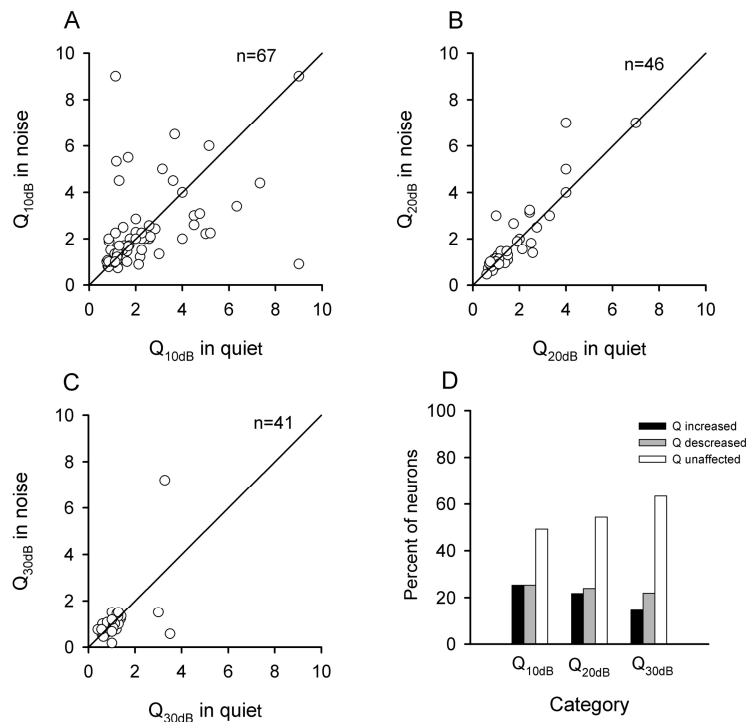


Fig. 4 Population data showing the effect of weak background noise on the Q value of frequency tuning curves of auditory cortex neurons

Each unfilled circle in panel A, B, and C shows the data of one neuron. The values of Q_{10dB} , Q_{20dB} , and Q_{30dB} are shown in Panel A, B, and C, respectively. Panel D illustrates the percent of neurons that showing various effects on Q value by weak background noise. The neurons analyzed are shown on the right corner of panels A, B and C.

3 讨论

听觉神经元对声刺激频率的调谐是听觉系统处理声音信号的一个重要方面。耳蜗基底膜是听觉系统对声音频率信息进行初步分析的部位，在听觉信息进一步上传的通路中，听觉中枢（如耳蜗核、下丘、内侧膝状体、听皮层）都表现出音调筑构特性^[17-20]，即神经元的特征频率在听觉中枢呈有规律的分布，形成听觉中枢对声刺激频率信息处理的地图。本研究中发现，弱背景噪声对大多数记录的神经元的特征频率无显著影响，因此，从这个角度来看，弱背景噪声不会对听皮层的整个频率地图产生显著影响。然而，如果从测得的频率反应域中分析的多个指标（如 CF、MT、 Q 以及频率调谐区域大小）综合来看，弱背景噪声对大多数神经元的频率调谐特性产生了影响。例如，研究中发现，弱背景噪声对有些神经元的频率调谐曲线无显著变化，但这些神经元频率反应域内的最佳频率反应域发生了变化，这说明用频率反应域比用频率调谐曲线能更全面地反映神经元的频率调谐特性。

本研究中发现，弱背景噪声可显著改变听皮层一部分神经元的特征频率、最低阈值、频率反应域的大小和 Q 值，其可能的原因是弱背景噪声改变了向被记录神经元输入的信息。在听觉信息上传通路中，听觉系统的各级中枢都可能对上行的听觉信息进行复杂整合。被记录的听皮层神经元接受来自听皮层内部、或皮层下听觉中枢神经元的多途径的兴奋性和抑制性输入投射（包括侧抑制）。虽然本研究中的背景噪声是阈下的，并不直接引起被记录的神经元产生听反应，但背景噪声可能使兴奋性输入被抑制，也可能使抑制性输入去抑制而改变兴奋性，这些输入信息在被记录的神经元进行整合后，则可能导致神经元听反应发生变化、特征频率或最低阈值发生偏移、以及频率反应域的大小发生改变。在弱背景噪声对神经元频率调谐曲线锐度的影响中， Q_{10dB} 、 Q_{20dB} 值比 Q_{30dB} 值更容易受到弱背景噪声的影响。由于侧抑制是改变频率调谐曲线锐度的一个重要因素^[21]，我们推测，弱背景噪声有可能改变位于频率调谐曲线一侧或两侧的侧抑制区，导致频率调谐曲线的尖部比中部更容易受到弱背景噪声的影响。

心理物理学研究表明^[11]，与安静条件下相比，弱噪声可降低被试对声刺激的探测阈值，提高被试对声刺激频率的分辨能力；与之相反，高强度的噪声可产生掩蔽效应，使被试对声刺激的探测阈值升高，对声刺激的频率分辨能力降低。弱背景噪声对听觉敏感性的提高有可能是听觉系统利用随机共振原理的一个证明。本研究中发现，弱背景噪声使部分听神经元的频率反应域增大、使另一部分神经元的频率反应域缩小，主要是背景噪声分别对这些神经元的听反应产生了易化或抑制性影响。相比而言，频率反应域增大的神经元的比例比频率反应域减小的神经元的比例稍大。因此，本研究结果为上述心理物理学研究提供了相关的神经生理学实验证据。

本研究中发现弱背景噪声可降低部分听皮层神经元的反应阈值，并对这些神经元的听反应有易化作用；与之相对比，高强度背景噪声对猫听皮层神经元反应的影响为抑制性的，可提高神经元的反应阈值，并使强度反应曲线向高强度方向移动^[9]。可见，背景噪声的强度不同，对听皮层神经元反应的影响也不同。此外，超前声和背景噪声对神经元频率调谐的影响也存在差异。超前纯音对听皮层神经元频率调谐的影响主要表现为抑制性影响^[22]，超前弱噪声对小鼠下丘神经元频率调谐的影响也以抑制性影响为主^[16]；与之相对比，本研究中发现弱背景噪声对听皮层部分神经元频率调谐的影响除抑制性影响外，也有易化性影响，而且有易化性影响的神经元的数目比有抑制性影响的神经元数目稍大。这些结果提示，超前声和背景噪声对神经元频率调谐的影响机制可能存在差异。

弱背景噪声对听皮层神经元频率调谐的影响发生在听觉通路的哪个部分，目前尚不十分清楚。然而，已有的研究提示，下丘的 GABA 能或甘氨酸能抑制可能对该影响有一定的贡献。在超前弱噪声条件下，弱噪

声对下丘神经元频率调谐曲线的锐化作用可以被 bicuculline 部分逆转^[16], 提示下丘 GABA 能抑制参与了该锐化作用. 在豚鼠的下丘微电泳 GABA_A 或甘氨酸的拮抗剂可导致一部分神经元的频率反应域的范围不变, 但反应域内部的放电数增多^[23]. 这说明, 下丘内部的抑制性影响也可影响神经元的频率调谐特性. 由于听皮层接受的信息来源于多级听觉中枢的复杂整合, 因此我们在听皮层上观察到的弱背景噪声对神经元频率调谐的影响可能来源于听皮层、以及听皮层下的听觉中枢. 此外, 本研究中测定频率反应域的纯音和背景噪声是同时出现的, 不排除背景噪声的影响最早可能出现在耳蜗基底膜上.

参 考 文 献

- 1 Zhang J, Chen L, Gao F, et al. Noise exposure at young age impairs the auditory object exploration behavior of rats in adulthood. *Physiol Behav*, 2008, 95(1-2): 229-234.
- 2 Gao F, Zhang J, Sun X, et al. The effect of postnatal exposure to noise on sound level processing by auditory cortex neurons of rats in adulthood. *Physiol Behav*, 2009, 97(3-4): 369-373.
- 2 Xu J, Yu L, Cai R, et al. Early continuous white noise exposure alters auditory spatial sensitivity and expression of GAD65 and GABAA receptor subunits in rat auditory cortex. *Cereb Cortex*, 2010, 20(4): 804-812.
- 4 Efrati A, Gutfreund Y. Early life exposure to noise alters the representation of auditory localization cues in the auditory space map of the barn owl. *J Neurophysiol*, 2011, 105(5): 2522-2535.
- 5 Chang E F, Merzenich M M. Environmental noise retards auditory cortical development. *Science*, 2003, 300(5618): 498-502.
- 6 Simmons A M, Schwartz J J, Ferragamo M. Auditory nerve representation of a complex communication sound in background noise. *J Acoust Soc Am*, 1992, 91(5): 2831-2844.
- 7 Frisina R D, Karcich K J, Tracy T C, et al. Preservation of amplitude modulation coding in the presence of background noise by chinchilla auditory-nerve fibers. *J Acoust Soc Am*, 1996, 99(1): 475-490.
- 8 Wang D, Pi J H, Tang J, et al. Dynamic modulations on intensity sensitivity evoked by weak noise in the inferior collicular neurons. *Sheng Li Xue Bao*, 2005, 57(1): 59-65.
- 9 Phillips D P, Kelly J B. Effects of continuous noise maskers on tone-evoked potentials in cat primary auditory cortex. *Cereb Cortex*, 1992, 2(2): 134-140.
- 10 Brugge J F, Reale R A, Hind J E. Spatial receptive fields of primary auditory cortical neurons in quiet and in the presence of continuous background noise. *J Neurophysiol*, 1998, 80(5): 2417-2432.
- 11 Zeng F G, Fu Q J, Morse R. Human hearing enhanced by noise. *Brain Res*, 2000, 869(1-2): 251-255.
- 12 Wiesenfeld K, Moss F. Stochastic resonance and the benefits of noise: from ice ages to crayfish and SQUIDS. *Nature*, 1995, 373(6509): 33-36.
- 13 Tang J, Pi J H, Wang D, et al. Effect of weak noise on the frequency tuning of mouse inferior collicular neurons. *Zoological Research*, 2004, 25(3): 191-197.
- 14 王欣, 吴飞健, 陈其才. 弱噪声前掩蔽对下丘神经元频率调谐的影响. *听力学及言语疾病杂志*, 2005, 13(5): 333-336.
- 15 王欣, 吴飞健, 陈其才. GABA 能抑制参与弱噪声对下丘频率调谐的前掩蔽. *华中师范大学学报*, 2006, 40(2): 248-251.
- 16 Wang X, Jen P H S, 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 Doron N N, Ledoux J E, Semple M N. Redefining the tonotopic core of rat auditory cortex: physiological evidence for a posterior field. *J Comp Neurol*, 2002, 453(4): 345-360.
- 18 Yajima Y, Hayashi Y. Response properties and tonotopical organization in the dorsal cochlear nucleus in rats. *Exp Brain Res*, 1989, 75(2): 381-389.
- 19 Poon P W, Sun X, Kamada T, et al. Frequency and space representation in the inferior colliculus of the FM bat, *Eptesicus fuscus*. *Exp Brain Res*, 1990, 79(1): 83-91.
- 20 Imig T J, Morel A. Tonotopic organization in ventral nucleus of medial geniculate body in the cat. *J Neurophysiol*, 1985, 53(1): 309-340.
- 21 Suga N. Sharpening of frequency tuning by inhibition in the central auditory system: tribute to Yasuji Katsuki. *Neurosci Res*, 1995, 21(4): 287-299.
- 22 Peng Y, Sun X, Zhang J. Contextual modulation of frequency tuning of neurons in the rat auditory cortex. *Neuroscience*, 2010, 169(3): 1403-1413.
- 23 LeBeau F E, Malmierca M S, Rees A. Iontophoresis in vivo demonstrates a key role for GABA(A) and

glycinergic inhibition in shaping frequency response areas in the inferior colliculus of guinea pig. *J Neurosci*, 2001, 21(18): 7303-7312.

The effect of weak background noise on the frequency tuning of neurons in the rat auditory cortex^{*}

PENG Yin-Ting, PU Qing, SUN Xin-De, ZHANG Ji-Ping^{**}

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

Abstract In natural environment, human and animals often percept signal sound stimuli in background noise conditions. However, it is not clear how the low-level weak background noise affect the coding of frequency tuning of auditory cortical neurons. In the present study, we determined how weak background noise affected the frequency response area of 79 neurons in the rat primary auditory cortex. The results demonstrated that weak background noise either suppressed or facilitated the responses of some cortical neurons to sound stimuli. Generally, the suppression of responses by weak background noise reduced the extent of frequency tuning and the extent of best frequency response area of auditory cortical neurons, and the facilitation of responses by weak background noise enlarged the extent of frequency tuning and the best response areas of the affected neurons. For a minority of neurons, weak background noise did not significantly change their extent of frequency tuning, but changed their extent of best frequency response area. Weak background noise did not change the characteristic frequency of 63.64% of the sample neurons and the minimum threshold of 55.84% of the sampled neurons. The tip of the frequency tuning curves of auditory cortical neurons was more susceptible to be affected by the background noise than the middle part of the frequency tuning curves of these neurons.

Key words background noise, frequency tuning, auditory cortex, frequency response area, characteristic frequency

* This work was supported by a grant from National Natural Science Foundation of China (NSFC No. 30970984), and the Opening Project of Shanghai Key Laboratory of Brain Functional Genomics and Key Laboratory of Brain Functional Genomics (East China Normal University), Ministry of Education.

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

Received: March 6, 2012

Accepted: May 10, 2012

Available online: May 17, 2012