



中国外傷学ジャーナル



音響兵器による人体への傷害：叙述的レビュー

Yue Li^a、Guangmin^b、Yongbo Zhao^a、Bingcang Li^b

^a Department of Neurosurgery, Xijing 986 Hospital, The Fourth Medical University, Xi'an, 710054, China

^b Department of Field Research Institute, Army Medical Center, Chongqing, 400042, China

印刷中、訂正版

受付：2024年5月10日

改訂：2024年10月27日

受理：2024年10月28日

オンライン公開：2025年4月19日

<https://doi.org/10.1016/j.cjtee.2024.10.009>

権利とコンテンツの取得

クリエイティブ・コモンズ・ライセンスに基づく
オープンアクセス

要約

音波兵器は、世界中のいくつかの国が積極的に開発し、軍隊に装備している非致死性兵器である。人体へのその傷害はますます重要になっている。これまでの音波兵器による人体への傷害、予防、治療に関する研究は体系的かつ包括的ではなかった。そこで、著者らは、特定の音響概念を説明した後、兵器の種類と用途、傷害のメカニズムと特徴、傷害閾値、生物学的影響、傷害の診断、傷害の予防と治療の観点から、超低周波および強音兵器を紹介する。最後に、国内外の少数の公開文献報告に基づいて、超音波兵器について簡単に紹介する。その目的は、将来の音波兵器傷害の予防と治療の参考を提供することである。

キーワード

音波兵器、超低周波兵器、強烈な音響兵器、超音波兵器、予防と治療

1.はじめに

音波兵器は非致死性兵器の一種であり、人体への影響と傷害のため、現代の戦争において人々の注目を集めている。音波兵器は、その周波数に基づいて、超低周波兵器、強力音波兵器、超音波兵器に分類できる。中国の科学者はこれまでに、超低周波兵器の概念¹⁻⁵、超低周波音場特性⁶、超低周波音の集束と標的設定^{7, 8}、超低周波音の心理的影響⁹、超低周波音の生物学的影響^{10, 11, 12}、超低周波音の中枢神経系および神経心理学的側面への影響¹³、超低周波音の軍事的応用¹⁴、超低周波音に対する物理的防護について報告している¹⁵。強力音波兵器については、中国の科学者らがその概念と応用^{16, 17, 18, 19, 20}、生物学的効果^{12, 21}、および有効性評価システム^{22, 23, 24}を紹介している。しかし、超音波兵器に関する文献報告は比較的少なく、超音波の物理的特性^{12, 21}と超音波兵器の基本原理¹⁷に関する報告は散発的である。

これまでの報告では音響兵器による人体への損傷とその予防・治療に関する包括的かつ体系的な研究が不足していることから、本稿では、音響兵器、音波兵器、超低周波兵器、強力音波兵器、超音波兵器、騒音兵器、予防・治療をキーワードに、SinoMed、CMCI、PubMed、Embase、Web of Science のデータベース、および Baidu Scholar や Microsoft Bing などの検索エンジンを通じて、2000 年 1 月から 2024 年 1 月までに発表された中国語と英語の文献を検索した。文献の選択基準は、(1)医療データベースおよびインターネット検索エンジンから収集された文献、(2)オリジナルの研究論文および研究報告とした。文献の除外基準は、(1)全文にアクセスできない、または中国語もしくは英語以外の言語で書かれた文献、(2)科学振興論文とした。最終的に、中国語の論文 24 件と英語の論文 32 件が含まれた。その目的は、音響兵器の将来の開発、防護、医療治療のための参考資料を提供することである。

2.音響概念

2.1 .音の周波数

音源による単位時間あたりの振動数は音の周波数、または可聴周波数と呼ばれ、ヘルツ (Hz) で測定される。超低周波音の周波数は 0.001 Hz から 20 Hz の範囲である。超低周波音は一般に人間の耳には聞こえないが、感知することができ、十分に高い出力レベルでは聞こえることがある^{25, 26}。超低周波音は、さまざまな産業、輸送、生活環境に広く存在し、核爆発、ロケット打ち上げなどの現象や^{9, 13}、地震、火山、竜巻、滝などの自然現象によつても生成される^{27, 28}。ワニ、ゾウ、キリン、クジラなどの動物は、超低周波音を長距離通信に使用できる^{27, 28}。超低周波音は波長が長く、例えば 5 Hz では 68m、7 Hz では 48.5m

である^{22,29}。20 Hz から 20 kHz の周波数は可聴音で、人間の耳は 1 kHz から 3 kHz の周波数に最も敏感である^{25, 26, 27}。超音波は 20 kHz より高い周波数を指し、人間の耳には聞こえないが、犬、猫、カメ、コウモリには聞こえる。また、クジラやイルカは獲物を探すのに超音波を使用する^{25, 26, 27}。超音波は指向性が高く、体を貫通できるため、医療用画像技術で内臓の構造情報を得ることができる³⁰。音の周波数は、低周波 (<400 Hz)、中周波 (0.4~1 kHz)、高周波 (>1 kHz) に分類される³¹。超低周波音と超音波はどちらも人体に共鳴を引き起こす可能性がある²⁵。

2.2 .騒音

騒音とは、不快で、過度に大きく、人体の健康に有害な音を指す。騒音は、音を発する物体の不規則な振動によって発生する。騒音は、定常騒音（音量の変動が 3dB を超えない）とパルス騒音（振幅が大きく、持続時間が短い）に分類できる³²。音の周波数と同様に、騒音も低周波、中周波、高周波に分類できる。

人間の聴覚システムは、高音圧レベル (SPL: Sound Pressure Level) でも低周波ノイズに対する耐性が高く、永続的な閾値シフト (PTS: Permanent Threshold Shifts) ではなく一時的な閾値シフト (TTS: Temporary Threshold Shifts) のみを引き起こす^{33, 34}。150 ~155 dB の低周波ノイズは、胸壁の振動、軽い吐き気、めまいを引き起こす可能性がある。154~171 dB では、心拍数の増加、皮膚の紅潮、嚥下痛、視覚障害、肋骨下の不快感、咳、胸骨の圧迫、呼吸困難につながる可能性がある³³。中周波ノイズが 120 dB に達すると、鼻腔または副鼻腔で共鳴し、触覚を増強する可能性がある。142 dB 以上では前庭系を刺激し、165 dB では痒みを引き起こす可能性がある³⁴。高周波騒音の場合、80~120 dB の音圧レベルで TTS または PTS が発生する可能性があり、120 dB では触覚や痒み、125 dB では前庭反応、140 dB では平衡感覚障害、160 dB では熱影響が生じる可能性がある³³。音の強さと暴露時間の組み合わせによって損傷のレベルが決まり、たとえば 135 dB で 7 分、140 dB で 40 秒、145 dB で 4 秒、150 dB で 0.4 秒、160 dB では鼓膜穿孔が発生する可能性がある(これまで鼓膜穿孔が内耳に保護作用をもたらすと考えられていたが、人間のデータでは、鼓膜穿孔は片側でも両側でも保護作用をもたらさないことが示唆されている)³⁵。

2.3 .音響パワー

音響パワーとは、単位時間あたりに特定の面積を通過する音響エネルギーの量を指す。エネルギーで測定する場合は、W/m²で表す音響強度と呼ばれる。圧力で測定する場合は、Pa を単位とする SPL と呼ばれる。SPL の指標は dB である²⁵。dB と Pa の換算式は $L = 20 \log_{10} \frac{P_1}{P_0}$ である。ここで、L は SPL、P₁ は比較対象となる音圧、P₀ は基準音圧（多くの場合 20 μPa とされる）を表す。音響パワーは、音速、音の周波数、振幅の 2 乗に正比例する。したがつ

て、超音波は高い音響パワーを持ち、爆発波は高い振幅のために高い音響パワーを持つ³¹。音響パワーが 120dB を超えると、高強度音とみなされ、人間の耳に不快感を与え、難聴を引き起こす可能性がある。140dB (200Pa) では人間の耳に痛みを感じ、160dB (2kPa) を超えると鼓膜破裂を引き起こし、173dB (9kPa) では肺破裂を引き起こす可能性がある^{30,33}。

2.4 .音響伝播

超低周波音と可聴音は同じ速度で伝播する³。これは、大気中では約 300~340 m/s、水中では 1480 m/s である^{7,21}。音波のエネルギーは伝播中に減衰および吸収され、湿度、温度、圧力などの要因によって影響を受ける¹⁹。音の減衰率は周波数の 2 乗に正比例するため、周波数が高くなると減衰が速くなる¹²。その結果、超低周波音は減衰が少くなり、長距離（数千～数万キロメートル）伝播が可能になる^{7,21}。一方、超音波は大幅に減衰するため、伝播距離が短くなる²⁹。音波の透過力は音の周波数に反比例する。例えば、7 Hz の超低周波音は、数メートルの厚さの鉄筋コンクリート壁や鋼板、海水、土壌層を透過するが、7 kHz の可聴音は紙一枚も通過できない^{14, 30}。

3.超低周波兵器

3.1 .兵器の種類と用途

現在、音響兵器には、音波砲、音波弾、音波銃の 3 種類があり、すべて音響発生器、電源装置、制御システムで構成されている¹⁴。中国科学院は、周波数が 20 Hz 未満の音波銃を開発した³⁶。米国¹⁸とフランス²⁰が開発した音波銃の SPL は、160dB に達する。超低周波兵器は、発生方法に基づいて 5 つのカテゴリに分類できる。(1) バースト型: 圧縮ガス、高圧蒸気、または高圧ガスをパルス状に放出して媒体を励起し、音波を発生させる。サイズが小さく、周波数が低く、制御が容易などの利点があるが、音波の強度が低く、影響範囲が短い。(2)爆発型: 超低周波は爆発によって発生し、爆発エネルギーの約 50% が衝撃波に変換され、その後減衰して超低周波を生成する。(3) チューブ型: 構造と動作原理はフルートに似ている。チューブ内の空気がチューブ自体と同じ周波数で振動すると、超低周波が発生する。(4) スピーカー型: 動作原理はスピーカーに似ている。特殊な振動板を使用して、振動によって超低周波を発生させる。(5) ビート周波数型: 異なる周波数の音波発生器を同時に使用して、それらの周波数の差に基づいて超低周波を発生させる²。強力な音波兵器と比較して、超低周波兵器の開発は、超低周波発生器の出力と持続時間を増やすのが難しい、兵器システムのサイズと重量を減らす、波ビームをより指向性と焦点を絞ったものにするなどの技術的な困難さのために、より困難である^{7,18,23}。

米国はソマリア戦争、ボスニア戦争、湾岸戦争において、極秘裏に超低周波兵器を使用してきた。ボスニア・セルビア軍に対する超低周波攻撃では、多数の兵士が数秒のうちに失神・嘔吐し、戦闘能力を喪失したと報告されている²⁰。米国はまた、ハバナ（キューバ）と広州（中国）の米国大使館職員が超低周波兵器による攻撃を受けたと疑っている^{27,28}。

3.2 .傷害のメカニズムと特徴

超低周波兵器が人体に及ぼす危害の主な特徴は、臓器の共鳴である。超低周波の周波数が人体臓器の固有周波数に近い場合、臓器は音波エネルギーを最大限に吸収し、共鳴によって損傷を引き起こす^{13,20}。また、超低周波は機械的エネルギーを熱エネルギー、生化学的エネルギー、生体電気エネルギーに変換し、細胞の分子構造に損傷を与える^{11,20}。超低周波刺激は脳を混乱させ、精神障害を引き起こす可能性がある一方、体性感覚受容体や内臓受容体を刺激すると、反射的な生理学的反応を引き起こす可能性がある。これらに基づいて、超低周波兵器は「神経型」と「臓器型」に分けられる^{12,13,20}。

神経系の超低周波兵器の周波数は 8~12 Hz で、これは頭部の固有周波数と同じである^{15,34}。これは脳波の α リズム (8~12 Hz、振幅 20~100 μ V、リラックスしているときによく見られる) とも一致しており、脳波には β リズム (14~30 Hz、振幅 5~22 μ V、思考しているときによく見られる)、 θ リズム (4~7 Hz、振幅 20~150 μ V、眠いときによく見られる)、 δ リズム (0.5~3 Hz、振幅 20~200 μ V、睡眠中によく見られる) もある³⁰。超低周波が頭部に共鳴すると、めまい、手足のしびれ、混乱、異常行動などを引き起こすことがある³⁰。ニュージーランド産ウサギの実験では、16 Hz/130 dB の超低周波に 20 分間さらすと δ リズムが大幅に増加し、6 Hz/110 dB にさらすと α リズムが θ リズムに変換されることが示されており、動物の脳波活動は超低周波によって大幅に抑制できることが示されている¹³。臓器型超低周波兵器の周波数は通常 4~18 Hz で、これは人体のさまざまな臓器の固有の振動周波数に対応している。胴体の周波数は 7~13 Hz、心臓は 5 Hz、胸腔は 4~6 Hz、腹腔は 6~9 Hz、腹壁は 10 Hz、骨盤腔と胸壁はそれぞれ 6 Hz と 60 Hz である^{9,12,15,34}。超低周波の周波数が人体の臓器の固有周波数に近づくと共鳴が起こり、耳鳴り、動悸、筋肉のけいれん、呼吸困難、さらには血管の破裂や臓器の損傷などの症状を引き起こす^{9,15,18}。超低周波の周波数が 2 Hz 未満の場合、人体は臓器レベルではなく全体として反応する^{27,28,33}。

3.3 .傷害閾値

超低周波による人体への傷害の程度は、その出力、周波数、および曝露時間によって異なる²⁵。出力が同じ場合、周波数によって傷害の種類が決まり、曝露時間によって傷害の程度が決まり、これも周波数と音圧に密接に関連している^{9,25}。人間と動物の構造と固有の周波数が異なるため、同じ超低周波パラメータが異なる生物に異なる影響を与える可能性があ

る⁹。20-25歳の男性15人を対象としたテストでは、10Hz/136dBの超低周波に15分間曝露すると、頭痛、口の乾燥、嚥下困難、手のひらの汗、極度の疲労などの症状が現れた。低周波と中周波の平均聴力閾値は10~15dB低下し、一部の内臓で顕著な振動が見られた。曝露をやめた後、ほとんどの症状は10~30分以内に消えたが、疲労感は持続した⁹。12.5~20.0Hz/105.0~113.5dBの超低周波音を6時間浴びせられた被験者は、落ち着きのなさ、筋肉の震え、けいれん、筋力の低下などの症状が67.8%に現れた¹³。1~30Hz/125dBの超低周波音に曝露されると、耳に圧迫感を感じ、作業能力が低下する可能性がある¹³。95~110dBを20分間浴びせられると眠気を催し、作業効率が低下する可能性がある³⁴。16Hz/95dBを30分間浴びせられると、拡張期血圧と心拍数が上昇する可能性がある³⁴。ただし、人体に無害な超低周波音もある。たとえば、2~15Hz/115dBでは作業のパフォーマンスに影響せず¹³、7.5Hz/130dBを50分間受けても人体への影響はごくわずかで³⁴、8Hz/130dBを30分間受けてもほとんどの人に悪影響はなく³⁴、10~15Hz/130~135dBを30分間受けても聴覚や前庭機能に影響はなく³⁴、7Hz/142dBを15分間受けてもめまいや見当識障害は起こらない³⁴。動物実験では、172dBの超低周波音はイヌに呼吸困難や窒息を引き起こす可能性があり、6~9Hz/195dBではサルやヒヒが即死する可能性があることが示されている^{6,11}。16Hz/105dBの超低周波音に10分間さらされると、ラットの音波に対する耐性時間が短縮され、10Hz/160dBの超低周波音は成体のサルの追跡行動を中断させる、聴力測定、耳音響放射(OAE)、聴性脳幹反応には影響がない³⁴。15~20Hz/140dBの超低周波音はブタやサルには影響を与えない³⁴。

一般的に90dBの超低周波音は無害であると考えられており⁹、120dBが超低周波音による損傷の閾値レベルである¹¹。140dBの超低周波音に短時間さらされただけでも人体に害を及ぼすのに十分であり^{9,34}、150dBに2~3分さらされると、回復不可能な損傷を引き起こし、死に至ることもある^{6,9,10,11}。パリの国際超低周波音専門委員会は、許容される超低周波音の強度を2Hzで130dB、4Hzで128dB、8Hzで125dB、16Hzで120dBに設定している^{6,11}。赤血球膜透過性、アデノシン三リン酸、コハク酸脱水素酵素活性の変化によると、超低周波音の周波数の影響は16Hz>8Hz>4Hz>2Hzの順であると判定されている^{9,10}。

3.4 .生物学的影響

超低周波音の人体に対する有害な生物学的影响としては、(1) 前庭的影響：例えばめまいや吐き気など^{7,28,34} (2) 聴覚的影響：例えば聴覚痛、中耳の圧迫感、不快感³⁷ (3) 内臓的影響：例えば吐き気、胸の圧迫感、幻覚^{27,28,34} (4) 心血管系への影響、例えば心拍数の増加(平均11回/分増加)や拡張期血圧の上昇(平均 1.2 ± 0.27 kPa増加)などがあるが、30分後には正常に戻る⁹ (5) 心理的影響：例えば恐怖、悲しみ、憂鬱、不安、集中力の欠如、嫌

悪、無関心、悲しみなどがある²⁵。(6) 慢性的な影響：例えば直腸がん、結腸がん、肺臓がんなどがある^{27,28,38}。

超低周波音は人体にも一定の効果がある。例えば、4 Hz/170 dB の音波マッサージは近視の進行を安定させ¹³、0.1~3 Hz の音波は痛みを和らげる¹⁰。麻酔時には、中程度の超低周波音は中枢神経系に鎮静作用をもたらし、外科的刺激による副作用を軽減する¹³。8~12 Hz の音波は集中力を高め、学習効率を高め、覚醒を高めることができる^{13,34}。8~12 Hz/72~79 dB では、腫瘍細胞膜の透過性が変化し、5-フルオロウラシルを併用することで神経膠芽腫細胞に対する殺傷効果を高めることができる¹³。また、超低周波音は骨髄の間葉系幹細胞の増殖活性を高め、アポトーシスを阻害する¹³。また 10 Hz/155~160 dB に 10 分間曝露すると、過敏反応を起こしているモルモットの生存率が向上することができ¹⁰、血管性認知症のラットの認知障害は超低周波音によって改善される可能性がある⁹。

3.5 .傷害の診断

超低周波兵器攻撃は、奇襲性（伝播が速い）と不可視性（聞こえず、目に見えない）に加え、作動距離が長く、貫通力が強いため^{12,18}、めまい、吐き気、胸の圧迫感、幻覚、恐怖、悲しみ、憂鬱、不安などの「不可解な症状」と呼ばれる症状が現れるまで、自分が超低周波音の被害を受けたことにすぐに気づくことは難しい³⁸。それでも、戦時中の部隊の兵士や平時における集まっている群衆の中で同時に症状が現れるか、現場に超低周波音検出装置（超低周波センサーなど）が備え付けられていない限り、攻撃源を特定して迅速に診断することは難しい。

3.6 .傷害の予防と治療

音響兵器からの防御は非常に困難である²。最善の防御策は、超低周波音の強度を最小限に抑え、曝露時間を短縮することである^{11,15}。あるいは、吸収、遮断、超低周波音の伝播中のエネルギー低減によって共鳴を低減する方法もある。中周波および高周波音を防御できる材料は数多くあるが、超低周波および低周波音を防御できる材料は現在のところ不足している⁹。超低周波音は透過力が強いため、通常の材料で作られた機器では効果的な防御を提供できない。中国の科学者が開発した超低周波対策用耳栓は、人体への被害を効果的に軽減できると報告されている⁹。さらに、高強度音楽は超低周波音を遮断し、特定の症状を緩和することができる^{10,11}。また、低強度の超低周波音は高強度音波による被害を軽減することができ、将来的には事前刺激効果によって超低周波音による被害に対する人間の耐性を高めるために利用される可能性がある⁹。

超低周波音は体内の酸化システムを活性化し、大量のフリーラジカル（訳者注：フリーラジカルとは活性酸素で人の体を酸化させ錆びさせるもの）を発生させ、脂質過酸化反応をさらに悪化させ、生体膜を損傷する可能性がある。そのため、 α -トコフェロール、ビタミン

C、2,3-ジメチル-2-スルホプロピオン酸ナトリウム、イミダゾール誘導体などの抗酸化剤やフリーラジカルスカベンジャーは、超低周波兵器による損傷に対する治療効果がある^{9,10,11}。グルタミン酸受容体拮抗薬は、超低周波の影響を受けた損傷ニューロンの数を効果的に減らすことができる¹¹。

4. 強烈な音響兵器

4.1. 武器の種類と用途

強力音響兵器は騒音兵器とも呼ばれ、可聴音響兵器に属し、現在、陸上型、車載型、艦載型など様々な製品がある^{18,22}。米軍の装甲車両に搭載された音波分散装置は、音圧レベル(SPL)が145 dBに達することがある²³。また、音爆弾や光爆弾の爆発によって発生する音圧レベル(SPL)は140 dBを超えることもあり^{23,39}、起爆砲弾は172 dBの大騒音を発することもある^{17,20,23}。米国が開発した長距離音響装置(LRAD)は最も有名な強力音響兵器であり、米陸軍、海軍、海兵隊、日本の海上自衛隊に装備されている^{19,38}。LRADは、150°から300°の角度で高周波(1 kHz~2.5 kHz³⁶または2 kHz~4 kHz²⁹)の指向性音ビームを放射する^{27,28}。その音圧レベル(SPL)は、1 mで165 dB^{12,30}、300mで、140 dBである²⁹。範囲は8.9 km³⁶あり、2 km²³または3 km³⁹以内で音声警告を発することができ、650m以内で強力な音の分散に使用できる²³。15m以内では永久的な聴力損失を引き起こす可能性がある^{27,28}。LRADにはさまざまな型があり、100X、300X、500X、1000X(警察用)^{28,38}、や2000X(軍隊用)^{18,19,27,28}などがある。米軍はアフガニスタン戦争とイラク戦争でLRADを使用したと報告されている^{31,39,40}。同様に、中国で開発されたさまざまなモデルの指向性強力音響ディスペンサーは、公安、武装警察、沿岸警備隊の部隊で広く使用されている¹⁹。

衝撃騒音は銃、大砲、爆発物によって発生し、定常騒音は装輪車両、航空機、船舶、航空母艦によって発生する⁴¹。衝撃騒音は定常騒音よりも人体への傷害が大きく、個人は定常騒音に比べて衝撃騒音に対して感受性が高くなる^{29,33}。通常、小火器の衝撃騒音は130~175 dBの範囲であり⁴²、サプレッサーを使用すると衝撃騒音を15~25 dBに低減できる⁴¹。たとえば、拳銃の騒音は168 dB(5.0 kPa)、ライフルは171 dB(7.2 kPa)、105 mm砲は188.0 dB(50.3 kPa)、迫撃砲は189.2 dB(58 kPa)である³³。反射の影響で、屋内騒音の継続時間は屋外騒音よりも長く(屋外では5~10ミリ秒、屋内では100ミリ秒以上)、伝播距離も長くなる⁴¹。米軍退役軍人の21%が難聴を患っており⁴³、射撃訓練後の兵士におけるPTSの発生率は13%(米国)⁴⁴、または24%(スウェーデン)である⁴⁵。フランス軍兵士419人のうち、耳鳴りが87.4%(n=366)、難聴が35.1%(n=147)、耳の痛みが21.2%(n=89)を占め、聴力閾値シフトは平均15.4 dBで、その結果、20%以上が難聴になった⁴⁶。

4.2 .損傷のメカニズムと特徴

人間の耳は、2kHz～4kHz³¹ または 2～5kHz^{12,23} の周波数範囲のインパルスノイズに最も敏感であるため、音響兵器は多くの場合、この敏感な周波数範囲を選択する。また、周波数が高くなるほど、音響パワーが大きくなる¹²。音響兵器によって損傷を受けた聴覚系は^{34,47}一時的または永続的な伝音性、感音性、または混合性の難聴になる可能性がある^{34,47}。低周波ノイズは高周波ノイズよりも恐ろしいと指摘されている²⁹。90～120dB の低周波ノイズを1分間受けると、人間はイライラしたり落ち着きがなくなったりする可能性があり、110～130dB では腸の痛みや吐き気、140～150dB では重度の組織損傷を引き起こす可能性があり、170dB では爆発による損傷に似ている^{31,33}。中周波ノイズは体腔内で共鳴を引き起こす可能性があるが³³、高周波および超高周波ノイズは体温の極端な上昇を引き起こし、組織の火傷や脱水症状を引き起こし、どちらも組織内での気泡形成を引き起こす可能性がある³³。

4.3 .傷害閾値

損傷の程度は、音響パワー、周波数、武器の動作距離によって異なる²⁰。通常の会話のSPL は約 60 dB である²⁹。120 dB では、人間の耳に不快感を感じ、難聴のリスクが高くなる。135～162 dB では、鼓膜破裂、迷路出血、耳石器が基底膜から剥離することがある^{23,37}。140 dB の騒音レベルに対する人間の許容時間は 1 秒を超えてはならない⁴⁸。また、4～6 kHz/140～155 dB のパルス騒音に 2 ms さらされると TTS を引き起こす可能性があり、より長い暴露や繰り返しの暴露は PTS につながる可能性がある³³。サルが 160dB の騒音レベルに 10 分間さらされると、心室頻拍(PTS)、心電図上の病的な T 波および QRS 波が現れ、虚血性心疾患や心筋梗塞を引き起こす可能性がある³¹。米国国立労働安全衛生研究所は、110dB への曝露は 1.5 分以内、120dB は 9 秒以内、129dB は 1 秒以内、130～140dB は 1 秒未満と推奨している³⁹。米国国防総省は、保護されていない耳の最大許容騒音レベルを 140dB と規定しており、140dB 以上の騒音レベルは急性音響外傷(AAT: Acute Acoustic Trauma) を引き起こす可能性がある³¹。

4.4 .生物学的影響

強力な音響兵器の生物学的影響は、以下の種類に分けられる。(1)聴覚的影響は、音伝導路への音響損傷とそれに伴う鼓膜破裂、耳小骨骨折、前庭感覚器官および内耳有毛細胞の損傷を指し、その結果、伝音性、感音性または混合性難聴、およびめまい、耳鳴りなどの症状が発生する可能性がある。また、TTS または PTS が発生する可能性があり、3、4、8kHz の高周波難聴が最も顕著であるが、0.25、0.5、1kHz の低周波難聴は区別がつきにくい場合がある。(2)非聴覚的影響は、交感神経系、神経内分泌系、胃腸系、免疫系、およびその他

の人体器官が強い音によって刺激され、頭痛、めまい、吐き気、嘔吐、心拍数および血圧の上昇を引き起こすことを指す^{34,47}。さらに、これらは肺損傷、心血管疾患および脳血管疾患、神経認知変化、および胃腸疾患の危険因子となる可能性がある^{12,21,31}。非聴覚的影響が聴覚的影響を悪化させることが報告されている³¹。これまでのところ、人間に対する聴覚的影響に関する研究は非聴覚的影響に関する研究よりもはるかに体系的かつ集中的であり、強い騒音が神経系や心血管系に与える影響は十分に強調されていない³¹。

4.5 .傷害の診断

急性音響外傷(AAT) の診断方法には、純音聴力検査 (PTA)、OAE、聴性誘発電位などがあるが、PTA が診断のゴールド スタンダードである^{49,50}。ある研究によると、PTA で検査を受けた 71 人のイスラエル兵のうち 41 人が自動小銃の射撃による AAT を経験しており、PTA では 11~14 kHz で最も感度が高く、OAE では 3~6 kHz で最も感度が高かった⁵⁰。また、PTA 検査では、米国軍と英国軍における難聴の発生率がそれぞれ 20%~30% と 28% であったのに対し⁵⁰、タイ軍における感音難聴の発生率は 64.35% であった⁵¹。

4.6 .傷害の予防と治療

4.6.1 .機器の保護

イヤーマフと耳栓はどちらも 500 Hz を超える騒音を約 15~45 dB 減衰できる、250 Hz 以下の騒音に対する保護ではイヤーマフは耳栓ほど効果的ではない。一方、フォーム製耳栓は低周波騒音を 35 dB 減衰でき^{33,41,52}、AAT の発生率を約 15 倍減らすことができる⁵¹。イヤーマフと耳栓を組み合わせると 160 dB を超える衝撃性騒音から保護でき、イヤーマフと耳栓および吸音ヘルメットを組み合わせると 800~7000 Hz の衝撃性騒音を 30~50 dB 減衰できる⁵¹。吸音材で作られた保護具は、低周波騒音よりも高周波騒音に対する保護に効果的である^{33,41}。専門的な防護具が手に入らない場合は、綿球、ティッシュ、またはカートリッジケースを騒音防止に使用できる⁵¹。

4.6.2 .外科手術

TTS、耳鳴り、痛み、めまい、その他の聴覚障害などの症状は、数分から数ヶ月以内に回復することがある³³。鼓膜の小さな穿孔の約 80%~90% は自然に治癒し、両側の小さな穿孔でも聴力は回復するが、鼓膜の 1/3 を超える穿孔は外科的に修復する必要がある³³。中耳小骨の骨折やずれも外科的な修復が必要である³³。聴覚障害のある患者は、聴覚と発話能

力を回復させるために補聴器を使用するか、人工内耳を装着する必要がある。これは、永続的な難聴を治療する唯一の信頼できる方法である³³。

4.6.3 薬物

薬物治療の主な目的は、蝸牛の微小循環を改善し、組織の低酸素症を是正することである。投薬が早いほど、治療効果は高まる⁵³。ステロイドは、蝸牛ニューロンの Na、K-ATPase を活性化することで、細胞浸透圧と化学勾配を改善し、神経伝導を回復させ、感音難聴に効果がある^{49,53}。プレドニゾロンの一般的な投与量は、投与経路に関係なく、1 mg/kg (最大 60 mg/日) を 10 日間連続投与する⁴⁶。プレドニゾロンは、ピラセタム(神経保護薬および抗血栓薬)と併用して、1 日 8 mg/L 生理食塩水の投与量を 10 日間連続で投与することで、満足のいく治療効果が得られる⁵³。メチルプレドニゾロンは、最初の 3 日間は 64 mg/日、次の 3 日間は 32 mg/日、その次の 3 日間は 16 mg/日の用量で経口摂取できる⁵⁴。高圧酸素療法には血管拡張作用があり、ステロイドと併用できる^{46,49,54}。ビタミン A、ビタミン B1、ニコチン酸、ビタミン E、ラザベミド、ケタミン、ベタヒスチン、イチョウ葉エキスなどの他の薬剤も使用できる^{6,49}。

N-アセチル-L-システインは抗酸化物質であり、音響外傷が発生する前の予防薬として、または音響外傷発生後 1 時間以内に 400 mg (4 時間を超えない) を経口投与し、24 時間後に再投与することで総量 800 mg を投与することで、TTS の治療には有効であるが、PTS の改善には効果がない⁵⁵。ナフトキノンニトロキシド、アナルギン、リザトリプタン、ゾルミトリプタン、アセチルサリチル酸、ニメスリド、イブプロフェン、ナプロキセンナトリウムは騒音性頭痛の治療に有効であるが、最も効果的なのはナフトキノンニトロキシドである。これは交感神経刺激薬であり、ノルエピネフリンの放出を促進し、鎮痛のためにオピオイド系を活性化する。1 日 3 回、0.14 mg の用量で点鼻スプレーとして使用することができる³⁸。

5.超音波兵器

現時点では、超音波兵器に関する文献は少なく、データも不完全であるが、これは兵器開発の技術的な難しさや兵器の実用性の低さに起因するものと考えられる^{18,20}。約 20 時間駆動する 9 V バッテリーで駆動する手持ち式超音波兵器は、15 ~ 30 kHz の超音波を発射でき、最大音圧レベルは 130 dB⁵⁶ または 145 dB¹⁷、有効範囲は 6 m である⁵⁶。米国が開発した超音波弾は、指向性の高い超音波を発信でき、洞窟などの限られた空間内にいる敵を攻撃することができる^{12,21}。

超音波の波長は、超低周波音 (医療診断では 10 μm~350 μm) よりも短い (<2cm、医療診断では 10 μm~350 μm)。超音波は超低周波音に比べて指向性が強いため、空气中を伝

播する際に損失や散乱が生じやすく、透過性が低くなる。しかし、液体や固体中を伝播する際の超音波の吸収減衰は小さいため、最大 15m の厚さの岩石、レンガ、金属、コンクリートの壁を透過できる^{12,17,21}。超音波は異なる物質の界面に遭遇すると反射し、そこで吸収されて熱エネルギーに変換されるため、界面温度が上昇する。この影響は周波数が高いほど大きくなる^{12,21}。

超音波兵器による傷害の症状は、超低周波兵器による傷害の症状と類似している¹⁷。超音波は気圧を高め、視覚のぼやけ、鼻や口のかゆみ、耳の痛み、皮膚の発熱、吐き気、嘔吐、腹痛などの生理反応を引き起こし、160dB では皮膚の火傷や体温の上昇を引き起こします。さらに、超音波は骨格との共鳴により骨折を引き起こすこともある^{25,29,37}。

6. 結論

音波兵器は人間に重大な被害や死亡をもたらす可能性は低いものの、超低周波兵器は奇襲攻撃、不可視性、長距離作用、強力な貫通力などの特徴があり、適時に診断することが難しいだけでなく、予防や治療も非常に困難である。強力な音響兵器は診断が比較的容易で、予防や制御手段も豊富であるが、非聴覚的影響に関する研究は、特に人体への被害がより広範囲にわたる戦時および非戦争活動中において、さらに強化する必要があり、したがって、今後の研究は、その予防と治療に焦点を当てるべきである。超音波兵器による傷害の症状は超低周波兵器によるものと類似していますが、これまでの研究報告が不足しているため、超音波兵器による傷害の研究を強化することは、今後の音響兵器研究の重要な分野の一つとなるはずである。

CRediT 著者貢献声明

Yue Li: 執筆(校閲・編集)、執筆(原稿)。**Guangming Yang:** 執筆(校閲・編集)。**Yongbo Zhao:** データキュレーション。**Bingcang Li:** 執筆(校閲・編集)、執筆(原稿)、監修、コンセプト策定。

倫理声明：適用なし。

資金調達：なし

利益相反の宣言：著者らは利益相反がないことを宣言する。

参考文献

1. Zhao X, Wang L, He J. Infrasound and infrasonic weapons. Coll Phys. 2005;5: 57e59. <https://doi.org/10.16854/j.cnki.1000-0712.2005.05.017>.
2. Ma L. Infrasound energy weapons. Natl Def Sci Technol. 2006;8:32e35.
3. Ma L, Fan X. Development status and injury factors of infrasound weapons. Sci Tech Inf. 2010;8. <https://doi.org/10.16661/j.cnki.1672-3791.2010.11.043>, 3-3.
4. Zhang W, Zhao J. Study on infrasound and infrasonic weapons. Silicon Val. 2011;13:60.
5. Gao WS. Invisible wave weapons (Part 4): infrasound weapons. China Publ Sci. 2021;4:30e31.
6. Zhang H, Xie Y, Huang B. Research on infrasound field characteristics of antideriv infrasonic weapons. J Ordn Equip Eng. 2016;8:11e14. <https://doi.org/10.11809/scbgxb2016.08.003>.
7. Xiao F. Nonlethal infrasonic weapons for on-site control. Acta Armamentarii. 2002;3:426e429. <https://doi.org/10.3321/j.issn:1000-1093.2002.03.037>.
8. Zeng G, Zhang X, Zhang Y. Research of the infrasound sound focus technology. J Proj Rockets Miss Guid. 2007;1. <https://doi.org/10.3969/j.issn.1673-9728.2007.01.087>, 278-279,282.
9. Liao D, Fu Y, Mei S, et al. Infrasound technology and its application in psychological warfare. Natl Def Sci Technol. 2021;42:58e62. <https://doi.org/10.13943/j.issn1671-4547.2021.05.10>.
10. Qiu P, Wen N, Jiang Y, et al. The physical existence and research significance of infrasound. Chin J Prev Med. 2003;1:57e59. <https://doi.org/10.3760/j.issn:0253-9624.2003.01.021>.
11. Guo Y, Cai S, Zhao Z, et al. Infrasound and infrasonic weapons. Bull Biol. 2007;42:3e5. <https://doi.org/10.3969/j.issn.0006-3193.2007.07.005>.
12. Meng R, Kang Z. The application of acoustics in non-lethal weapons. Audio Eng. 2020;44:70e72. <https://doi.org/10.16311/j.audioe.2020.04.019>.
13. Li Z. Research progress on the action mechanism of infrasound on the central nervous system. Pract J Med Pharm. 2014;31:747e749. <https://doi.org/10.14172/j.cnki.issn1671-4008.2014.08.114>.
14. Niu LJ, Li JH. Application of infrasound to them military affair. J Detect Control. 2007;S1. <https://doi.org/10.3969/j.issn.1008-1194.2007.z1.001>, 1-4,8.
15. Huang J, Ding M, Qiu SH. Injury effect of navy new concept weaponry on

- combatants and its medical prevention. *Acad J Nav Med Univ.* 2019;40:1144e1147. <https://doi.org/10.16781/j.0258-879x.2019.10.1144>.
- 16. Li Z. Development and Application of Sonic Dispersion Shields. *Police Technol*; 2013;61e66.
 - 17. Li A. Mechanism of sonic weapons and their application in counterterrorism. *Police Technol*. 2014;85e87.
 - 18. Zhang B, Liang YF. Research on the development of non-lethal weapons. *J CAEIT*. 2015;10:6e16.
 - 19. Zhang H, Ma Z, Wang L. Research on development of police acoustic weapon. *J CAEIT*. 2016;11:1e6. <https://doi.org/10.3969/j.issn.1673-5692.2016.01.001>.
 - 20. Gao W. Invisible wave weapons (part five): noise weapons. *Chin Public Sci*. 2021;5:26e27.
 - 21. Li G, Liu L. Application of acoustics in non-lethal weapons. *Technol Found Natl Def*. 2005;3:38e40.
 - 22. Jiang X, Guo S. Research on effectiveness valuation of non-lethal sonic weapons. *J Appl Acoust*. 2016;35:122e127.
 - 23. Jiang X, Guo S, Liu X, et al. Research on effectiveness evaluation of loud sonic non-lethal weapons. *J Ordnance Eng Coll*. 2016;28:5e9. <https://doi.org/10.3969/j.issn.1008-2956.2016.05.002>.
 - 24. Zhou C, Zhou K, He L, et al. Evaluation of acoustic non-lethal weapons based on Analytical Hierarchy Bayesian Network. *J Ord Equip Eng*. 2019;40:222e227.
 - 25. Rich M. New world war: sonic weapons. <https://Newworldwar.org/sw.htm>; 2025. Accessed March 17, 2025.
 - 26. Skopec R. Naphazoline nitrate treat the Frey effect of microwave and other sonic weapon's damages in Human's Internal, Endogenous Organs. *Ann Biomed Sci Eng*. 2019;3:1e9. <https://doi.org/10.29328/journal.abse.1001004>.
 - 27. Skopec R. Science has a solution for sonic weapons caused cancer. *Clin Med Rep*. 2018;2:2e4. <https://doi.org/10.15761/CMR.1000117>.
 - 28. Skopec R. The Frey effect of microwave sonic weapons. *Drug Des Int Prop Int J*. 2018;2:195e199. <https://doi.org/10.32474/DDIPIJ.2018.02.000137>.
 - 29. Vinokur R. Brief notes on non-lethal acoustic weapon. *Sound Vib*. 2022;56:293e295. <https://doi.org/10.32604/sv.2022.026300>.
 - 30. Heys T. Sonic, infrasonic, and ultrasonic frequencies: the utilisation of waveforms as weapons, apparatus for psychological manipulation, and as instruments of physiological influence by industrial, entertainment, and military organizations (preprint). Res Sq. DOI:10.24377/LJMU.t.00006092.

31. Zhi W, Wang H, Zou Y, et al. Acute high level noise exposure can cause physiological dysfunction in macaque monkeys: insight on the medical protection for special working environmental personnel. *Health Care*. 2021;9:840. <https://doi.org/10.3390/healthcare9070840>.
32. Smalt CJ, Lacirignola J, Davis SK, et al. Noise dosimetry for tactical environments. *Hear Res*. 2017;349:42e54. <https://doi.org/10.1016/j.heares.2016.11.008>.
33. Altmann J. Acoustic weapons - a prospective assessment: sources, propagation, and effects of strong sound. *Sci Global Secur*. 2001;9:165e234. <https://scienceandglobalsecurity.org/archive/sgs09altmann.pdf>.
34. Jauchem JR, Cook MC. High-intensity acoustics for military nonlethal applications: a lack of useful systems. *Mil Med*. 2007;172:182e189. <https://doi.org/10.7205/milmed.172.2.182>. PMID: 17357774.
35. Tas , li H, G€okg€oz MC, Çoban VK, et al. Does tympanic membrane perforation have a protective effect on the inner ear in blast-injured patients. *Ulus Travma Acil Cerrahi Derg*. 2021;27:79e84. <https://doi.org/10.14744/tjtes.2020.87639>.
36. Clarke M. Why are there sonic weapons and what is their impact?. <https://www.majella-clarke.com/post/why-are-there-sonic-weapons-and-what-is-their-impact>; 2021. Accessed March 17, 2025.
37. Brehm M, Wheeler A. Acoustic Weapons (preprint). Res sq. https://www.researchgate.net/publication/334050374_Acoustic_Weapons.
38. Skopec R. Naphazoline nitrate treat the Frey effect of microwave and other sonic weapon's damages in human's internal, endogenous organs. *Ann Biomed Sci Eng*. 2019;3:1e9. <https://doi.org/10.29328/journal.abse.1001004>.
39. Casey-Maslen S. Non-kinetic-energy weapons termed 'non-lethal'. <https://www.geneva-academy.ch/joomlatools-files/docman-files/Non-Kinetic-Energy%20Weapons.pdf>; 2010.
40. Littlechild C. Sonic weapons explained: how do they work, and what are they used for? <https://www.slashgear.com/1262422/sonic-weapons-explained/>. 23 Apr, 2023. Accessed 17 March, 2025.
41. Jokel C, Yankaskas K, Robinette MB. Noise of military weapons, ground vehicles, planes and ships. *J Acoust Soc Am*. 2019;146:3832. <https://doi.org/10.1121/1.5134069>.
42. Sonstrom Malowski K, Gollihugh LH, Malyuk H, et al. Auditory changes following firearm noise exposure, a review. *J Acoust Soc Am*. 2022;151:1769. <https://doi.org/10.1121/10.0009675>.
43. Zagadou B, Chan P, Ho K, et al. Impulse noise injury prediction based on the

- cochlear energy. *Hear Res.* 2016;342:23e38. <https://doi.org/10.1016/j.heares.2016.02.017>.
44. Wall AT, Wagner CM, Rasband RD, et al. Cumulative noise exposure model for outdoor shooting ranges. *J Acoust Soc Am.* 2019;146:3863. <https://doi.org/10.1121/1.5132289>.
 45. Muhr P, Rosenhall U. The influence of military service on auditory health and the efficacy of a Hearing Conservation Program. *Noise Health.* 2011;13:320e327. <https://doi.org/10.4103/1463-1741.82965>.
 46. Lachaux J, Giere PA, Vuillemin Q, et al. Long-term hearing loss after acute acoustic trauma in the French military: a retrospective study. *Mil Med.* 2024;189:e698ee704. <https://doi.org/10.1093/milmed/usad337>.
 47. Lee J, Bowley DM, Miles JA, et al. The downrange acoustic toolbox: an active solution for combat-related acute acoustic trauma. *J Spec Oper Med.* 2020;20:104e111. <https://doi.org/10.55460/R1KY-M91Z>.
 48. Brenner R. Sound as a weapon part 4: sound protection and isolation products. <https://survivallife.com/sound-protection/>. Accessed March 17, 2025, 25 Jul, 2019.
 49. Moon IS. Noise-induced hearing loss caused by gunshot in South Korean military service. *Mil Med.* 2007;172:421e425. <https://doi.org/10.7205/milmed.172.4.421>.
 50. Büchler M, Kompis M, Hotz MA. Extended frequency range hearing thresholds and otoacoustic emissions in acute acoustic trauma. *Otol Neurotol.* 2012;33:1315e1322. <https://doi.org/10.1097/MAO.0b013e318263d598>.
- Y. Li, G. Yang, Y. Zhao et al. Chinese Journal of Traumatology xxx (xxxx) xxx