

# 地铁运行状态下室内结构噪声评价标准适用性分析\*

赵佳美<sup>1</sup> 户文成<sup>1</sup> 孙宏波<sup>2</sup> 姚琨<sup>1</sup> 李宪同<sup>3#</sup>

(1.北京市科学技术研究院城市安全与环境科学研究所,北京 100054;

2.天津市生态环境监测中心,天津 300191;3.中国环境监测总站,北京 100012)

**摘要** 从适用范围、评价量、限值要求、测试要求、数据处理要求等多方面分析《住宅建筑室内振动限值及其测量方法标准》(GB/T 50355—2018)、《城市轨道交通引起建筑物振动与二次辐射噪声限值及其测量方法标准》(JGJ/T 170—2009)和《城市轨道交通(地下段)列车运行引起的住宅建筑室内结构振动与结构噪声限值及测量方法》(DB31/T 470—2009)3个标准间的差异。应用3个标准分别进行室内结构噪声实测数据分析评价,探讨测量地铁引发的室内结构噪声的标准适用性。结果表明:(1)地铁引起的室内结构噪声特征频率集中在以50 Hz或63 Hz为主的低频段;(2)GB/T 50355—2018可以分频段评价列车通过时间内产生的影响,在室内结构噪声测试与评价时建议优先选用GB/T 50355—2018;(3)相比JGJ/T 170—2009,DB31/T 470—2009昼间限值相对宽松,但夜间更加严格。此外,对3个标准在实际应用中可能存在的问题提出了针对性建议。

**关键词** 地铁运行 室内结构噪声 标准适用性

DOI:10.15985/j.cnki.1001-3865.2023.07.015

**Criteria applicability analysis of indoor structure noise caused by subway operation** ZHAO Jiamei<sup>1</sup>, HU Wencheng<sup>1</sup>, SUN Hongbo<sup>2</sup>, YAO kun<sup>1</sup>, LI Xiantong<sup>3</sup>. (1. Institute of Urban Safety and Environmental Science, Beijing Academy of Science and Technology, Beijing 100054; 2. Tianjin Eco Environment Monitoring Center, Tianjin 300191; 3. China National Environmental Monitoring Centre, Beijing 100012)

**Abstract:** This paper analyzed the differences of the application situation, evaluation variables, limit requirements, test requirements and data processing requirements among the three criteria which were “Standard for limits and measurement methods of vibration in the room of residential building” (GB/T 50355-2018), “Standard for limit and measuring method of building vibration and secondary noise caused by urban rail transit” (JGJ/T 170-2009) and “Limits and measurement methods for vibration and ground-borne noise in dwellings caused by the moving vehicles of urban rail transit (underground railway)” (DB31/T 470-2009). Three criteria were used to analyze and evaluate the measured resident indoor structure noise respectively, and discuss the applicability of the criteria for measuring the indoor structure noise caused by the subway operation. The results showed that: (1) the characteristic frequency of indoor structural noise caused by subway operation was mainly concentrated in the low frequency bands such as 50 Hz or 63 Hz. (2) GB/T 50355-2018 evaluated the impact in different frequency bands during the subway operation, which was preferred for indoor structural noise testing and evaluation. (3) Compared with JGJ/T 170-2009, the limits of DB31/T 470-2009 were less stringent in daytime but more stringent in nighttime. In additions, this paper provided some targeted suggestions for the practical application of three criteria.

**Keywords:** subway operation; indoor structural noise; criteria applicability

随着城市轨道交通发展,地铁运行产生的环境噪声和振动的影响日益显著,地铁运行引起的邻近建筑物室内结构噪声及振动影响已成为困扰民众的重要环境问题。由地铁运行所致的室内结构噪声不仅对人们的正常生活、工作和学习有所影响,而且对地铁运行线路附近的古建筑及室内精密仪器也会产生不同程度的影响。

WALKER等<sup>[1]</sup>对地铁运行时引起建筑物结构噪声的问题进行研究,表明其噪声频率主要集中于20~200 Hz,且地铁运行时伴有门窗等结构振动引发的高频噪声。诸多学者围绕地铁运行对室内结构噪声的影响展开了研究:KURZWEIL<sup>[2]</sup>、FIALA等<sup>[3]</sup>利用有限元预测等分析方法研究了地铁运行时产生的建筑物结构振动与结构噪声的声学特性以及

第一作者:赵佳美,女,1994年生,硕士,助理研究员,研究方向为噪声与振动控制。\*通讯作者。

\*北京市科学技术研究院创新培育类项目(No.11000022T000000468168)。

与房间尺寸的关系; AASVANG 等<sup>[4]</sup>采用 AF 计权最大声级( $L_{pAFmax}$ )分析隧道结构噪声对附近建筑物室内居民影响; 辜小安等<sup>[5]</sup>研究了地铁运行引起建筑物结构噪声的预测和实测结果的差异; 综合胡月琪等<sup>[6]</sup>、邬玉斌等<sup>[7]</sup>和张中平等<sup>[8]</sup>的测试结果得出, 虽然不同测点所得的建筑物结构噪声主频段不同, 但地铁运行时引起建筑物结构噪声能量主要分布在 500 Hz 以下低频区域。

针对地铁运行引起的沿线建筑物室内结构噪声及振动带来的环境问题, 目前我国选用《住宅建筑室内振动限值及其测量方法标准》(GB/T 50355—2018)、《城市轨道交通引起建筑物振动与二次辐射噪声限值及其测量方法标准》(JGJ/T 170—2009)、《城市轨道交通(地下段)列车运行引起的住宅建筑室内结构振动与结构噪声限值及测量方法》(DB31/T 470—2009)这 3 个标准对地铁运行所致的结构噪声影响进行评价研究。因此, 本研究对比相关标准, 给出不同标准针对地铁运行引起的沿线建筑物室内结构噪声分析的适用情况, 以期为测试人员提供指导, 为环境管理工作提供参考。

## 1 常用标准

针对地铁运行所致室内结构噪声测试与评价常用的 3 个标准的评价量、适用范围、限值要求等差异见表 1。

### 1.1 适用范围

GB/T 50355—2018 适用范围最广, 建筑物内水泵、电梯及城市轨道、铁路轨道振动等引起的室内结构噪声均可以据此开展测试和评价; JGJ/T 170—2009 未区分地下段和地面段, 即所有轨道交通形式都适用; DB31/T 470—2009 为上海市地方标准, 且不适用于地面段轨道。

### 1.2 评价量

3 个标准评价的频率范围存在差异, 不同频率范围的评价量之间不能直接比较。GB/T 50355—2018 以 1/1 倍频程等效声级为评价量; JGJ/T 170—2009 和 DB31/T 470—2009 均以等效 A 声级为评价量, 其中 DB31/T 470—2009 评价量还包括最大声级(等效 A 声级测量值的算术平均值), 夜间应同时满足最大声级要求。

每个测点获得的多次列车噪声值, GB/T 50355—2018 和 DB31/T 470—2009 要求采取算术平均法计算测点的评价量; JGJ/T 170—2009 要求按式(1)进行计算:

$$L_{Aeq} = 10 \lg \left( \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N 10^{0.1 L_{AE,i}} \right) \quad (1)$$

式中:  $L_{Aeq}$  为昼间或夜间的等效 A 声级, dB;  $i$  为通过列车序号;  $N$  为通过列车总数量;  $L_{AE,i}$  为列车  $i$  运行时测点的等效 A 声级, dB。

### 1.3 限值要求

由于 3 个标准限值要求不同, 其评价结果可能存在差异。如上海市地铁运行时 1 类区某建筑物测

表 1 室内结构噪声评价常用标准  
Table 1 Common standards for indoor structural noise evaluation

| 标准                               | 评价量                          | 适用范围                                           | 分类       | 限值要求/dB |    |    |          |
|----------------------------------|------------------------------|------------------------------------------------|----------|---------|----|----|----------|
|                                  |                              |                                                |          | 昼间      |    | 夜间 |          |
| GB/T<br>50355—2018 <sup>1)</sup> | 31.5~250 Hz<br>1/1 倍频程等效声级   | 住宅建筑室内振动及其<br>结构噪声的测量                          | 卧室       | 31.5 Hz | 76 | 79 | 69       |
|                                  |                              |                                                |          | 63 Hz   | 59 | 63 | 51       |
|                                  |                              |                                                |          | 125 Hz  | 48 | 52 | 39       |
|                                  |                              |                                                |          | 250 Hz  | 39 | 44 | 30       |
|                                  |                              |                                                | 起居室      | 31.5 Hz | 76 | 79 | 76       |
|                                  |                              |                                                |          | 63 Hz   | 59 | 63 | 59       |
|                                  |                              |                                                |          | 125 Hz  | 48 | 52 | 48       |
|                                  |                              |                                                |          | 250 Hz  | 39 | 44 | 39       |
| JGJ/T<br>170—2009                | 16~200 Hz<br>等效 A 声级         | 城市轨道交通列车运行<br>引起沿线建筑物振动与<br>室内二次辐射噪声的控<br>制和测量 | 0 类区     |         | 38 |    | 35       |
|                                  |                              |                                                | 1 类区     |         | 38 |    | 35       |
|                                  |                              |                                                | 2 类区     |         | 41 |    | 38       |
|                                  |                              |                                                | 3 类区     |         | 45 |    | 42       |
|                                  |                              |                                                | 4 类区     |         | 45 |    | 42       |
| DB31/T<br>470—2009               | 20~20 000 Hz<br>等效 A 声级、最大声级 | 上海市范围内的城市轨<br>道交通(地下段)工程设<br>计与运行管理            | 1 类区     |         | 40 |    | 30       |
|                                  |                              |                                                |          |         |    |    | 40(最大声级) |
|                                  |                              |                                                | 2、3、4 类区 |         | 45 |    | 35       |
|                                  |                              |                                                |          |         |    |    | 45(最大声级) |

注: <sup>1)</sup> 限值要求中, 低值为一级限值, 高值为二级限值。

得昼间结构噪声等效 A 声级在 16~200、20~20 000 Hz 均介于 38~40 dB,按照 JGJ/T 170—2009 评价判定为超标,按照 DB31/T 470—2009 评价判定为达标;若夜间等效 A 声级在 16~200、20~20 000 Hz 内介于 30~35 dB,则按照 JGJ/T 170—2009 为达标,按照 DB31/T 470—2009 为超标,该应用场景下两者存在矛盾之处,可见上海市地方标准 DB31/T 470—2009 对夜间噪声管控更为严格。

#### 1.4 测试要求

GB/T 50355—2018 允许振动引起的结构噪声仅测量一次时长不小于 1 min 的等效值,或者测量多个短时间的等效值,应按最不利原则确定,且需测量至少 5 列列车通过过程。JGJ/T 170—2009 要求结构噪声昼间测量应选择行车高峰时段,夜间测量时间内通过列车应不少于 5 列,昼、夜间测试时段均不应小于 1 h。DB31/T 470—2009 中要求测量昼、夜间(地下段)列车运行时段的等效 A 声级,时长不小于 20 min,必要时测量 1 h,夜间还应测量列车运行引起结构噪声最大声级,通过列车不少于 5 列。

对于受影响地点,地铁通过时产生的结构噪声对人影响最大。因此,GB/T 50355—2018 测量时段更有针对性;JGJ/T 170—2009 和 DB31/T 470—2009 要求的测量时间相对较长,测量结果可能包含除列车运行外的其他声源影响。

此外,GB/T 50355—2018 规定测量前除需对声学测量仪器灵敏度进行校准之外,还需要应用声校准器在 250 Hz 进行检查,对仪器的质量控制更严格,更有利于保证测试结果的准确性。

#### 1.5 数据处理要求

3 个标准对噪声测量结果和背景值的修正和修约方式也存在差异。GB/T 50355—2018 要求首先对噪声测试值及背景噪声值按“4 舍 5 入”修约取整,再计算两者差值;根据修约标准确定修正值,最后将噪声测试修约取整后的值加上修正值即为最终结果。JGJ/T 170—2009 和 DB31/T 470—2009 未明确差值详细处理方式,一般将噪声测量值与背景噪声值先作差,按照“4 舍 6 入,逢 5 则奇进偶舍”修

约取整<sup>[9-10]</sup>得到修正值,将原始噪声测量值与修正值相加后,再修约取整得到最终结果。由于数据修约方式不同,可能会引起最终评价结果的判定存在差异。

此外,3 个标准的噪声修正值也存在差异(见表 2)。噪声测量值与背景噪声值相差 3~9 dB 时,3 个标准规定的对应修正值一致;对于噪声测量值与背景噪声值相差小于 3 dB 和等于 10 dB 时,对应的修正值不同。对于差值小于 3 dB 的情况,GB/T 50355—2018 中修正-3 dB,JGJ/T 170—2009 中无法修正,而 DB31/T 470—2009 中对于差值介于 0.5~3 dB 则按-3 dB 修正,差值小于 0.5 dB 时无法修正。对于差值等于 10 dB 的情况,GB/T 50355—2018 和 JGJ/T 170—2009 中均不进行修正,但 DB31/T 470—2009 中需修正-1 dB。

#### 1.6 房间类型

GB/T 50355—2018 中卧室昼间评价量限值与起居室昼夜均相同,夜间评价量限值则不同。此外,GB/T 50355—2018 规定了两级限值,一级限值为适宜达到的限值,二级应为不得超过的限值。目前标准中仅规定符合高要求建筑适用一级标准,未明确一级和二级建筑物的具体分类要求,在实际监测过程中可能会存在主观判断进而导致评价结果差异。JGJ/T 170—2009 根据声功能区 5 个类别分别设定限值,未明确房间类型,在实际监测过程中建议尽可能选择受噪声影响较大的房间。DB31/T 470—2009 中也未对被评价的房间类型提出明确要求,且仅将 1 类区单独设定限值;对各类功能区夜间限值进行明确要求,突显了对夜间声环境更为严格的管控。

## 2 实测分析验证

### 2.1 数据采集

对于受地铁运行结构噪声影响的 3 个住宅内进行数据采集,房间类型均为卧室。测点 A 和 C 位于 2 类区,测点 B 位于 1 类区。测点 A、B、C 距地铁外轨线水平距离分别约为 0、50、30 m,距离墙壁 1.5 m。在现场使用 BK2270 声级计测得结构噪声。测

表 2 结构噪声测量结果修正  
Table 2 Correction table for structural noise measurements

| 标准              | 修正值/dB |       |       |       |      |
|-----------------|--------|-------|-------|-------|------|
|                 | 数据无效   | -3 dB | -2 dB | -1 dB | 0 dB |
| GB/T 50355—2018 |        | ≤3    | 4~5   | 6~9   | ≥10  |
| JGJ/T 170—2009  | <3     | 3     | 4~5   | 6~9   | ≥10  |
| DB31/T 470—2009 | <0.5   | 0.5~3 | 4~5   | 6~10  |      |

试依照 GB/T 50355—2018、JGJ/T 170—2009 和 DB31/T 470—2009 中相关要求执行。

## 2.2 数据分析

在测点 A(昼间)、B(昼间/夜间)、C(昼间)分别测试 1 h 内列车通过时的声级。测得 16~200 Hz 频段下背景噪声值,其中测点 A 为 25.3 dB,测点 B 昼间为 17.4 dB、夜间为 15.7 dB,测点 C 为 19.9 dB。根据数据修约规则修约后并剔除干扰数据后获得各点列车通过时的线性频谱(见图 1)。

地铁运行时引起的室内结构噪声规律基本一致:昼间 3 个测点在地铁运行时引起的结构噪声最高值主要在 50 Hz 或 63 Hz 频段,与前人研究得出地铁运行时引起的结构声主要分布在 40~63 Hz 频段的结论<sup>[11-12]</sup>吻合。

经计算获得 1 h 内各列车通过时产生的室内结构噪声等效 A 声级(包含背景噪声),结果见表 3。

结合图 1 和表 3 可知,地铁运行引起的结构噪

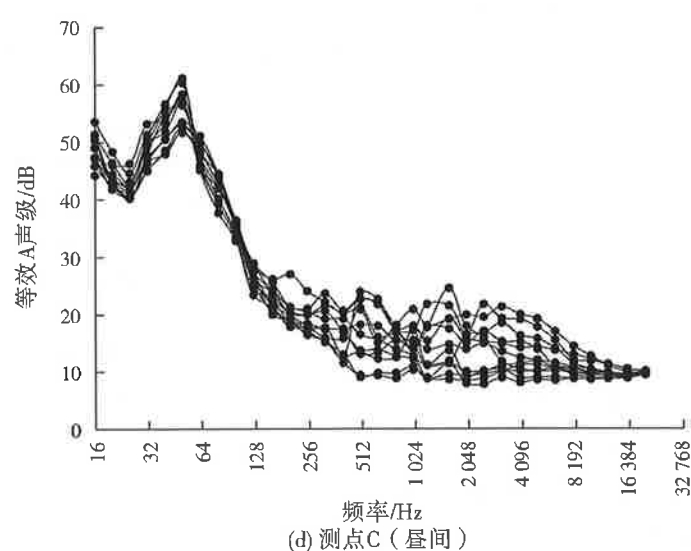
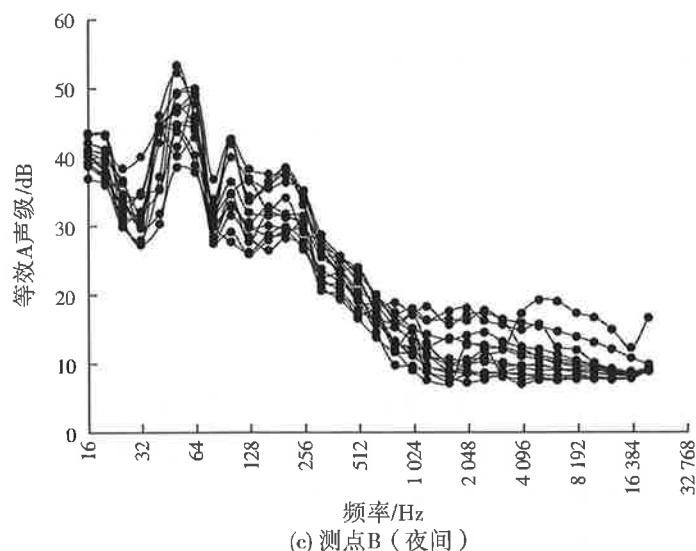
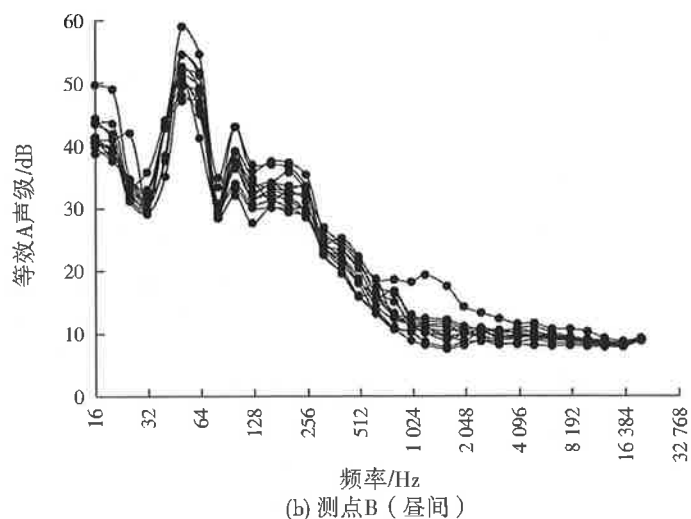
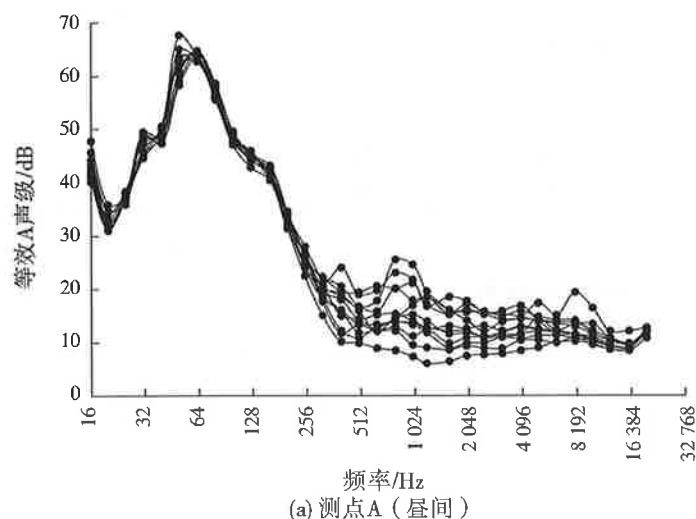
声能量主要集中在低频范围,受距离、位置、建筑物、背景噪声等影响,地铁运行时引起的室内结构噪声在 16~200 Hz 频段以及 20~20 000 Hz 频段范围内的等效 A 声级有所差异。从峰值来看,地铁运行引起的室内结构噪声主要集中在 250 Hz 以下,因此建议选择 250 Hz 以下频段范围进行分析。

## 3 不同标准评价结果分析

### 3.1 基于 GB/T 50355—2018 分析

根据 GB/T 50355—2018,住宅建筑室内结构噪声二级限值为不得超过的限值,此处采用二级限值作为标准限值进行评价。为方便比较评价结果,对各测点 1 h 内通过列车时各频段结构噪声的算数平均值(修正后)进行计算,确定超标情况(见表 4)。

由表 4 可以看出,在测点 A 处,1 h 内地铁运行时产生的室内结构噪声在 63 Hz 频段超标 3.5 dB。测点 B、C 处均不超标。



注:每个测点都进行了多次测量,图中展示了每次测量的结果。

图 1 3 个测点地铁运行时室内声级测试结果

Fig.1 Test results of sound pressure level of 3 sites during the subway operation

表 3
 3 个测点地铁运行时室内等效 A 声级计算结果<sup>1)</sup>

Table 3
 The results of indoor A-weighted sound pressure level during the subway operation for 3 sites
 dB

| 列车编号   | 16~200 Hz<br>等效 A 声级 | 20~20 000 Hz<br>等效 A 声级 | 列车编号   | 16~200 Hz<br>等效 A 声级 | 20~20 000 Hz<br>等效 A 声级 |
|--------|----------------------|-------------------------|--------|----------------------|-------------------------|
| A.1/D  | 41.0                 | 41.1                    | B.2/N  | 23.4                 | 27.9                    |
| A.2/D  | 42.0                 | 42.0                    | B.3/N  | 22.0                 | 27.0                    |
| A.3/D  | 41.0                 | 41.3                    | B.4/N  | 30.2                 | 32.6                    |
| A.4/D  | 41.1                 | 41.3                    | B.5/N  | 25.6                 | 31.0                    |
| A.5/D  | 40.7                 | 40.8                    | B.6/N  | 26.7                 | 31.0                    |
| A.6/D  | 40.3                 | 40.4                    | B.7/N  | 31.6                 | 34.0                    |
| A.7/D  | 41.0                 | 41.3                    | B.8/N  | 30.7                 | 32.7                    |
| A.8/D  | 40.1                 | 40.4                    | B.9/N  | 23.4                 | 28.3                    |
| A.9/D  | 41.3                 | 41.5                    | B.10/N | 30.5                 | 32.8                    |
| A.10/D | 41.9                 | 42.0                    | B.11/N | 31.1                 | 33.0                    |
| A.11/D | 41.7                 | 41.8                    | B.12/N | 26.9                 | 30.7                    |
| A.12/D | 40.5                 | 40.7                    | B.13/N | 25.7                 | 31.0                    |
| B.1/D  | 31.2                 | 32.9                    | B.14/N | 26.7                 | 31.3                    |
| B.2/D  | 25.5                 | 30.8                    | C.1/D  | 29.2                 | 31.3                    |
| B.3/D  | 29.3                 | 31.2                    | C.2/D  | 32.0                 | 34.4                    |
| B.4/D  | 27.5                 | 30.0                    | C.3/D  | 28.6                 | 30.6                    |
| B.5/D  | 32.1                 | 34.0                    | C.4/D  | 29.8                 | 33.4                    |
| B.6/D  | 25.3                 | 29.1                    | C.5/D  | 31.7                 | 33.0                    |
| B.7/D  | 30.1                 | 32.0                    | C.6/D  | 26.9                 | 28.1                    |
| B.8/D  | 28.9                 | 31.8                    | C.7/D  | 28.6                 | 31.8                    |
| B.9/D  | 26.2                 | 28.9                    | C.8/D  | 28.2                 | 30.4                    |
| B.10/D | 28.5                 | 30.5                    | C.9/D  | 30.5                 | 33.3                    |
| B.11/D | 25.5                 | 29.6                    | C.10/D | 27.4                 | 29.0                    |
| B.12/D | 32.7                 | 33.9                    | C.11/D | 28.8                 | 29.9                    |
| R.1/N  | 22.4                 | 29.4                    | C.12/D | 28.3                 | 29.2                    |

注：<sup>1)</sup>列车编号最后一个字母“D”代表昼间、“N”代表夜间。

表 4
 基于 GB/T 50355—2018 的评价结果

Table 4
 Evaluating results based on GB/T 50355-2018

| 测点    | 是否超过标准限值 | 超标量/dB  |       |        |        |
|-------|----------|---------|-------|--------|--------|
|       |          | 31.5 Hz | 63 Hz | 125 Hz | 250 Hz |
| A(昼间) | 是        | -27.5   | 3.5   | -1.6   | -9.9   |
| B(昼间) | 否        | -36.2   | -9.6  | -12.1  | -8.5   |
| B(夜间) | 否        | -31.7   | -8.1  | -6.3   | -1.4   |
| C(昼间) | 否        | -25.0   | -5.9  | -16.4  | -19.6  |

表 5
 基于 JGJ/T 170—2009 和 DB31/T 470—2009 的评价结果

Table 5
 Evaluating results based on JGJ/T 170-2009 and DB31/T 470-2009

| 标准                             | 指标              | 测点 A(昼间) | 测点 B(昼间) | 测点 B(夜间) | 测点 C(昼间) |
|--------------------------------|-----------------|----------|----------|----------|----------|
| JGJ/T 170—2009 (16~200 Hz)     | 平均等效 A 声级/dB    | 40.9     | 29.3     | 28.8     | 29.6     |
|                                | 平均等效 A 声级超标量/dB | -0.1     | -8.7     | -6.2     | -11.4    |
| DB31/T 470—2009 (20~20 000 Hz) | 平均等效 A 声级/dB    | 26.0     | 30.0     | 26.0     | 23.1     |
|                                | 平均等效 A 声级超标量/dB | -19.0    | -10.0    | -4.0     | -21.9    |
|                                | 最大声级/dB         |          |          | 38.2     |          |
|                                | 最大声级超标量/dB      |          |          | -1.8     |          |

3.2 基于 JGJ/T 170—2009 和 DB31/T 470—2009 分析

对于 1 h 内测点 A、B、C 地铁运行时的评价量，按照 JGJ/T 170—2009 要求，采用式(1)计算；按照 DB31/T 470—2009，昼间等效声级为背景修正后列车运行时段的等效 A 声级，夜间额外计算最大声

级。由表 5 可知，测点 A、B、C 处，采用 JGJ/T 170—2009 和 DB31/T 470—2009 评价，室内结构噪声均满足标准限值要求，但不同标准评价下的超标量有所差异，JGJ/T 170—2009 的昼间限值更严格，DB31/T 470—2009 夜间限值更严格。

综上，采用 3 个标准分别评价地铁运行时引起

的室内结构噪声时可能得到不同的评价结果:GB/T 50355—2018 可能由于部分频段超标导致整体评价结果为超标;JGJ/T 170—2009 昼间限值更严格,DB31/T 470—2009 夜间限值更严格,且DB31/T 470—2009 夜间评价还需同时满足最大声级的限值要求,因此可能存在采用 JGJ/T 170—2009 评价昼间监测结果超标,但采用 DB31/T 470—2009 评价昼间监测结果满足限值要求,而采用 JGJ/T 170—2009 评价夜间监测结果满足限值要求,但采用 DB31/T 470—2009 评价夜间监测结果超标的情况。

#### 4 结论与建议

(1) 地铁运行引起室内结构噪声影响的频段集中在 50 Hz 或 63 Hz,建议优先考虑其低频范围内的室内结构噪声影响。

(2) 3 个标准中,GB/T 50355—2018 按不同频段给出标准限值,有助于根据频段特征采取有效降噪措施,建议优先选用 GB/T 50355—2018。相比 JGJ/T 170—2009,DB31/T 470—2009 昼间限值相对较为宽松,但夜间更加严格。GB/T 50355—2018 应进一步明确一、二级建筑的定义;DB31/T 470—2009 和 JGJ/T 170—2009 应明确数据处理步骤及修约要求。

(3) 建议生态环境、住房和城乡建设、交通运输等不同部门在制定标准时尽量统一标准评价量和测量方法,实现不同标准之间的衔接,从而进一步促进噪声污染防治标准体系的实用性。

#### 参考文献:

[1] WALKER J G, CHAN M. Human response to structurally radiated noise due to underground railway operations[J]. Journal of Sound and Vibration, 1996, 193(1): 49-63.

[2] KURZWEIL L G. Ground-borne noise and vibration from underground system[J]. Journal of Sound and Vibration, 1979, 66(3): 335-340.

[3] FIALA P, DEGRANDE G. Numerical modeling of ground-borne noise and vibration in buildings due to surface rail traffic[J]. Journal of Sound and Vibration, 2007, 301(3/4/5): 718-738.

[4] AASVANG G M, BO E, RONTSCHILD K. Annoyance and self-reported sleep disturbances due to structurally radiated noise from railway tunnels[J]. Applied Acoustics, 2008, 68(9): 970-981.

[5] 辜小安, 田春芝. 地铁振动对建筑物内二次结构噪声影响预测[J]. 铁道劳动安全卫生与环保, 2000, 27(1): 62-64.

[6] 胡月琪, 刘倩, 王峥, 等. 北京市地铁列车运行引起的建筑室内结构噪声污染特征与评价[J]. 环境工程技术学报, 2017, 7(5): 606-614.

[7] 邹玉斌, 宋瑞祥, 曾钦娥, 等. 地铁所致某音乐排练厅室内二次结构噪声测试与仿真[J]. 噪声与振动控制, 2017, 37(6): 120-125.

[8] 张中平, 郭建辉. 地下轨道交通结构噪声与振动频率特性分析[J]. 环境监控与预警, 2014, 6(3): 26-31.

[9] HJ 706—2014, 环境噪声监测技术规范 噪声测量值修正[S].

[10] GB/T 8170—2008, 数值修约规则与极限数值的表示和判定[S].

[11] 杨尚福. 不同土体条件下地铁列车引起的环境振动及建筑物二次结构噪声分析[D]. 成都: 西南交通大学, 2019.

[12] 贺玉龙, 张群, 陈瑞, 等. 成都地铁诱发室内结构噪声实测与分析[J]. 噪声与振动控制, 2020, 40(2): 202-206.

编辑: 徐婷婷 (收稿日期: 2022-08-17)

(上接第 985 页)

[12] 杨洁, 瞿攀, 王金生, 等. 土壤中重金属的生物有效性分析方法及其影响因素综述[J]. 环境污染与防治, 2017, 39(2): 217-223.

[13] JAIN C K. Metal fractionation study on bed sediments of River Yamuna, India[J]. Water Research, 2004, 38(3): 569-578.

[14] MORADI A, HONARJOO N, NAJAFI P, et al. A human health risk assessment of soil and crops contaminated by heavy metals in industrial regions, central Iran[J]. Human and Ecological Risk Assessment, 2016, 22(1/2): 153-167.

[15] 宁涵, 王梦雨, 余广彬, 等. 钝化剂对土壤砷、铅、镉的人体生物有效性的影响研究[J]. 生态毒理学报, 2021, 16(6): 201-212.

[16] 中国环境监测总站. 中国土壤元素背景值[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1990.

[17] 黄金凤. 废电路板元器件金属含量及其浸出特性与环境风险评估[D]. 绵阳: 西南科技大学, 2022.

[18] 钟晓兰, 周生路, 赵其国, 等. 长三角典型区土壤重金属有效态的协同区域化分析、空间相关分析与空间主成分分析[J]. 环境科学, 2007, 28(12): 2758-2765.

[19] 胡彪, 回文龙. 从废阴极射线管含铅玻璃中回收金属铅的研究进展[J]. 化工环保, 2017, 37(4): 19-24.

[20] 夏家淇. 农用地块土壤污染分类标准制订方法探讨[J]. 生态与农村环境学报, 2019, 35(3): 405-408.

编辑: 胡翠娟 (收稿日期: 2022-12-19)