植物资源与环境学报，2026，**35**(1)：93-103
Journal of Plant Resources and Environment

城市道路绿化带降噪植物优选与群落构建——以广州市为例

邱思慧[1,2]，杨燕华[3]，范蓉思媛[1,2]，孔冬艳[4]，俞梦笑[1]，刘菊秀[1]，闫俊华[1]，江　军[1,①]
（1. 中国科学院华南植物园，广东 广州 510650；2. 中国科学院大学，北京 100049；
3. 广东生态工程职业学院，广东 广州 510520；4. 河南省林业资源监测院，河南 郑州 450045）

摘要：为筛选出具有良好降噪效能的城市道路绿化带植物并构建最优配置的植物群落，以广州市 8 条主干道绿化带为研究对象，分析不同时间段道路绿化带物种类型、结构特征以及环境因子对降噪效能的影响。结果表明：广州道路绿化带植物有 42 科 68 属 81 种(含种下等级，下同)。高峰期道路绿化带的最小声级噪声衰减率($R_{L_{min}}$)、最大声级噪声衰减率($R_{L_{max}}$)、等效声级噪声衰减率($R_{L_{eq}}$)、声暴露级噪声衰减率(R_{SEL})、综合噪声衰减率(R_{com})的均值均高于平峰期，整体降噪效能较优。“乔+灌+草”模式道路绿化带的 $R_{L_{min}}$、$R_{L_{max}}$、$R_{L_{eq}}$、R_{SEL}、R_{com} 值最大，整体降噪效能最优，“乔+灌”和“灌+草”模式次之，“灌木”模式最差。高峰期道路绿化带 R_{com} 值的关键影响因子为枝下高、叶面积指数、湿度；平峰期道路绿化带 R_{com} 值的关键影响因子为 Simpson 多样性指数、叶面积指数、Shannon 多样性指数和 Pielou 均匀度指数。高峰期，$R_{L_{max}}$、$R_{L_{eq}}$、R_{SEL} 和 R_{com} 值与绿化带宽度、叶面积指数、Pielou 均匀度指数、湿度呈极显著($P<0.01$)或显著($P<0.05$)正相关，而与枝下高呈极显著或显著负相关；平峰期，$R_{L_{min}}$、$R_{L_{max}}$、$R_{L_{eq}}$、R_{SEL} 和 R_{com} 值与绿化带宽度、叶面积指数、物种丰富度指数、Simpson 多样性指数、Shannon 多样性指数和 Pielou 均匀度指数呈极显著或显著正相关。综合研究结果显示：在绿化带植物群落构建上，应推行“乔+灌+草”模式，其中乔木层应选择小叶榄仁(*Terminalia neotaliala* Capuron)等冠幅和胸高断面积较大、枝叶繁茂的物种；灌木层应选择朱蕉〔*Cordyline fruticosa* (Linn.) A. Chev.〕等叶片数量多、叶表面被毛、质地厚且分枝低的物种；草本层应选择蓝花草(*Ruellia brittoniana* Leonard)等叶片狭长且生长密集的物种。

关键词：城市道路绿化带；噪声衰减率；配置模式；物种筛选；影响因子

中图分类号：S731.8；X593　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**1674-7895(2026)01-0093-11
DOI：10.3969/j.issn.1674-7895.2026.01.09

Optimization and community construction of noise reduction plants in urban roadside green belts：a case study of Guangzhou，China

QIU Sihui[1,2]，YANG Yanhua[3]，FAN Rongsiyuan[1,2]，KONG Dongyan[4]，YU Mengxiao[1]，LIU Juxiu[1]，YAN Junhua[1]，JIANG Jun[1,①]（1. South China Botanical Garden，Chinese Academy of Sciences，Guangzhou 510650，China；2. University of Chinese Academy of Sciences，Beijing 100049，China；3. Guangdong Eco-Engineering Polytechnic，Guangzhou 510520，China；4. Henan Forestry Resources Monitoring Institute，Zhengzhou 450045，China），*J. Plant Resour. & Environ.*，2026，**35**(1)：93-103

Abstract：Taking the green belts along eight major roads of Guangzhou City as research objects，the effects of plant species types，structural characteristics，and environmental factors on noise reduction efficiency of roadside green belts at different time periods were analyzed，and the urban roadside green

收稿日期：2024-10-28
基金项目：广州市科技计划项目（E33309）；广东省基础与应用基础研究基金项目(2023A1515011947)
作者简介：邱思慧(2000—)，女，福建南平人，硕士研究生，主要从事城市生态学研究。
①通信作者 E-mail：jiangjun@scib.ac.cn
引用格式：邱思慧，杨燕华，范蓉思媛，等. 城市道路绿化带降噪植物优选与群落构建——以广州市为例[J]. 植物资源与环境学报，2026，35(1)：93-103.

belt plants with superior noise reduction efficiency were screened and the optimal plant community configuration pattern was constructed. The results show that there are 81 species (including infraspecies, the same below) of plants belonging to 68 genera of 42 families in roadside green belts of Guangzhou City. The averages of noise attenuation rate of the minimum sound level ($R_{L_{min}}$), noise attenuation rate of the maximum sound level ($R_{L_{max}}$), noise attenuation rate of the equivalent sound level ($R_{L_{eq}}$), noise attenuation rate of the sound exposure level (R_{SEL}), and the comprehensive noise attenuation rate (R_{com}) of the roadside green belt at peak period are higher than those at off-peak period, and the overall noise reduction efficiency is better. $R_{L_{min}}$, $R_{L_{max}}$, $R_{L_{eq}}$, R_{SEL} and R_{com} values of the "tree+shrub+grass" pattern roadside green belt are the largest, the overall noise reduction efficiency is the best, followed by the "tree+shrub" and "shrub+grass" patterns, and the "shrub" pattern is the worst. The key influence factors for R_{com} value of the roadside green belt at peak period are height under branch, leaf area index, and humidity; those of the roadside green belt at off-peak period are the Simpson diversity index, leaf area index, Shannon diversity index, and Pielou evenness index. At peak period, $R_{L_{max}}$, $R_{L_{eq}}$, R_{SEL}, and R_{com} values show highly significant ($P<0.01$) or significant ($P<0.05$) positive correlations with green belt width, leaf area index, Pielou evenness index, and humidity, while show highly significant or significant negative correlations with height under branch; at off-peak period, $R_{L_{min}}$, $R_{L_{max}}$, $R_{L_{eq}}$, R_{SEL}, and R_{com} values show highly significant or significant positive correlations with green belt width, leaf area index, species richness index, Simpson diversity index, Shannon diversity index, and Pielou evenness index. The comprehensive research results indicate that for green belt plant community construction, the "tree+shrub+herb" pattern should be carried out, among which the tree layer should select species such as *Terminalia neotaliala* Capuron with large crown width and basal area at breast height, and dense foliage; the shrub layer should select species such as *Cordyline fruticosa* (Linn.) A. Chev. with numerous leaves, hairy leaf surface, thick texture, and low branching; the herb layer should select species such as *Ruellia brittoniana* Leonard with narrow and elongated leaves and dense growth pattern.

Key words: urban roadside green belt; noise attenuation rate; configuration pattern; species screening; influence factor

改革开放以来,中国城市化进程加快,在提高人们生活水平的同时,也引发了一系列城市生态环境问题,比如城市交通快速发展带来的噪声污染问题。持续性噪声污染会刺激人体中枢神经系统,引起身体激素分泌异常和听力系统损伤[1-2],从而影响城市居民的身心健康,降低居民生活质量,阻碍城市的健康可持续发展[3]。

道路绿化带不仅可以有效阻断噪声传播,缓解城市交通噪声污染,还兼具滞尘、降温和美化城市环境的生态功能[4-5]。目前,关于道路绿化带降噪效能的研究主要集中在植物叶片、树皮等物理特征的吸声特性及其对不同频率噪声的响应[6-8],[9]157-158,[10],以及绿化带宽度、排列形式等结构参数对降噪效能的影响[11-13]。研究发现,薄而大的叶片、茂密的枝条、厚而多孔的树皮能增加植物对中高频噪声的消减程度,且绿化带宽度增加和复层种植可显著提升降噪效果[9]157-158,[10,12-13]。然而,学者们对道路绿化带物种类型、结构特征以及外部环境因子如何影响其降噪效能的系统研究较为缺乏[7-8],[9]4-15,对不同时间段绿化带降噪效能差异性的对比研究也无系统报道。

广州地处亚热带季风气候区,水热条件优越,为绿化植物的生长提供了十分有利的条件。但作为中国人口分布集中、经济发展迅速的中心城市之一,广州的噪声污染问题日益严重。为提高居民生活质量,维持城市健康可持续发展,亟需开展广州城市道路绿化带降噪效能方面的研究。鉴于此,本研究以广州市中心城区主干道绿化带为研究对象,在充分调查和分析绿化植物类型、结构特征以及环境因子等相关指标的基础上,通过实地动态监测的方法,定量评估广州道路绿化带在降噪方面的生态效能,探究最优降噪效能的植物群落配置模式及关键影响因子,旨在为广州道路绿化带景观的规划设计与合理布局提供理论参考依据,促进城市生态环境质量改善,服务生态文明城市建设。

1 研究区概况和研究方法

1.1 研究区概况

广州地处华南地区,广东省中南部,属亚热带季风气候。该区域日照充足,热量丰富,雨量充沛,干湿

季分明;年均降水量在 1 600 mm 以上,年平均气温 21.5 ℃,年平均空气相对湿度 77%。选取广州市交通运输繁忙、道路密集、车流量大、噪声污染严重的 4 大中心城区(海珠区、荔湾区、天河区、越秀区)中的滨江路、广州大道南、花地大道等 8 条道路绿化带作为研究地(表 1)。

表 1 广州中心城区噪声监测点概况
Table 1 Overview of noise monitoring points in central urban area of Guangzhou City

绿化带编号 No. of green belt	纬度 Latitude	经度 Longitude	宽度/m Wide	面积/m^2 Area	绿化带编号 No. of green belt	纬度 Latitude	经度 Longitude	宽度/m Wide	面积/m^2 Area
海珠区 Haizhu District					天河区 Tianhe District				
滨江路 Binjiang Road					科韵路 Keyun Road				
C1	N23°06′37″	E113°16′55″	8.4	84	C21	N23°07′20″	E113°22′16″	3.2	32
C2	N23°06′36″	E113°16′55″	8.4	84	C22	N23°07′03″	E113°22′05″	2.1	21
C3	N23°06′32″	E113°16′59″	8.4	84	C23	N23°07′01″	E113°22′05″	2.0	20
C4	N23°06′29″	E113°17′02″	2.0	20	C24	N23°07′33″	E113°22′05″	3.6	36
C5	N23°06′29″	E113°17′06″	6.5	65	C25	N23°07′33″	E113°22′05″	3.6	36
广州大道南 Guangzhou Avenue South					临江大道 Linjiang Avenue				
C6	N23°05′36″	E113°18′36″	6.0	60	C26	N23°06′44″	E113°21′07″	4.8	48
C7	N23°05′30″	E113°18′36″	5.6	56	C27	N23°06′44″	E113°21′07″	4.2	42
C8	N23°05′26″	E113°18′36″	7.0	70	C28	N23°06′50″	E113°20′28″	4.9	49
C9	N23°05′25″	E113°18′36″	2.7	27	C29	N23°06′51″	E113°20′13″	5.6	56
C10	N23°05′23″	E113°18′36″	3.5	35	C30	N23°06′54″	E113°19′55″	4.2	42
荔湾区 Liwan District					越秀区 Yuexiu District				
花地大道 Huadi Avenue					东风路 Dongfeng Road				
C11	N23°04′36″	E113°13′41″	6.0	60	C31	N23°08′11″	E113°14′53″	2.0	20
C12	N23°04′33″	E113°13′37″	2.0	20	C32	N23°08′19″	E113°15′00″	4.0	40
C13	N23°04′14″	E113°13′48″	3.6	36	C33	N23°08′18″	E113°15′00″	4.0	40
C14	N23°04′14″	E113°13′48″	3.6	36	C34	N23°08′19″	E113°15′00″	10.2	102
C15	N23°04′13″	E113°13′48″	3.6	36	C35	N23°08′18″	E113°14′56″	10.2	102
龙溪大道 Longxi Avenue					中山路 Zhongshan Road				
C16	N23°04′31″	E113°12′36″	4.0	40	C36	N23°07′49″	E113°16′37″	10.5	105
C17	N23°04′30″	E113°12′32″	4.0	40	C37	N23°07′46″	E113°16′41″	15.3	153
C18	N23°04′31″	E113°12′32″	4.0	40	C38	N23°07′46″	E113°16′41″	8.0	80
C19	N23°04′27″	E113°12′18″	4.0	40	C39	N23°07′47″	E113°16′44″	7.8	78
C20	N23°04′27″	E113°12′18″	4.0	40	C40	N23°07′45″	E113°16′48″	2.0	20

1.2 研究方法

1.2.1 *植被群落调查* 根据百度地图交通出行大数据平台实时监测数据(https://jiaotong.baidu.com/congestion/city/urbanrealtime?cityCode=257),在广州 4 大中心城区各选取 2 条车流量大、噪声污染严重的主干道,在每条主干道中选取整体布局美观、植物种类丰富、群落配置模式多样的绿化带设置调查样方,每条主干道设置 5 个长 10 m、宽不小于 2 m 的样方,共 40 个样方(表 1)。这些绿化带样方的配置模式包括“乔+灌”(12 个)、“灌+草”(2 个)、“灌木”(2 个)以及“乔+灌+草”(24 个)4 种模式,占比分别为 60%、30%、5%和 5%。

对所有绿化带样方开展植物群落调查。其中,乔木层记录乔木的种名、株数、高度、胸径、枝下高(乔木从地表面到树冠最下分枝点的垂直高度);灌木层记录灌木的种名、株数(无法确定株数时记录覆盖面积)、高度以及冠幅;草本层记录草本的种名、盖度。使用胸径尺(精度 1 mm)测量绿化带宽度、胸径、灌木垂直投影最长长度(l)及其垂直方向的最宽宽度(b),并计算冠幅(CW),计算公式为 $CW = l \times b$;使用 LAI-2200C 冠层分析仪(美国 LI-COR 公司)测量叶面积指数(各绿化带样方重复测量 5 次,结果取平均值);使用 CGQ-1 测高仪(精度 0.1 m,哈尔滨光学仪器厂有限公司)测量乔木的高度和枝下高;用目测法估算草本盖度。绿化带高度为样方内所有植物高度的均值,枝下高为绿化带样方内乔木层植物枝下高的

均值。

1.2.2 群落多样性指数计算 根据文献[14-16]中的方法统计道路绿化带乔木层物种的相对高度、相对优势度、相对频度,灌木层物种的相对密度、相对高度、相对频度,草本层物种的相对密度、相对盖度、相对频度,并计算道路绿化带各物种的重要值,道路绿化带重要值为绿化带样方内所有物种重要值的均值;同时计算群落物种多样性指数,包括物种丰富度指数(R)、Simpson 多样性指数(D)、Shannon 多样性指数(H')和 Pielou 均匀度指数(E)。

1.2.3 噪声测量 在干季(2023 年 10 月—2024 年 4 月)风速小于 5 m·s^{-1}的晴朗天气开展道路绿化带噪声监测实验。根据《声环境质量标准》(GB 3096—2008)中的方法,在交通高峰期(7:00—9:00 或 17:00—19:00)和平峰期(10:00—12:00 或 14:00—16:00)的每个样方监测点,使用 2 台 AWA629 便携式多功能声级计(量程 20~143 dB,杭州爱华仪器有限公司)同时测量绿化带前方 0.2 m 处和绿化带后方 0.2 m 处的实时噪声数据,用于衡量绿化带对噪声的消减程度。为提高监测数据的精度,数据连续测量时间为 1 min,每个监测点重复测量 3 次,每个监测样方内平行设置 3 组前后对比测量点。在监测噪声的同时,同步记录风速、温度和湿度,用于分析外部环境因子对绿化带降噪效能的影响。

选取噪声数据中最小声级(L_{min})、最大声级(L_{max})、等效声级(L_{eq})、声暴露级(SEL)作为噪声分析指标。其中,L_{min}表示特定时间段内的最低声级,用来确定环境中的背景噪声水平;L_{max}表示特定时间段内的最高声级,用来识别和预防潜在的噪声峰值;L_{eq}表示特定时间段内的等效声级,即这段时间内的平均声级;SEL 用于衡量短时间内噪声暴露水平。

为减少外界因子的干扰,利用噪声衰减率(R)衡量不同配置模式道路绿化带的降噪效能,计算公式为 $\mathrm{R}=(\mathrm{L}_{n+1}-\mathrm{L}_n)/\mathrm{L}_n$;式中,R 为噪声衰减率,$\mathrm{L}_{n+1}$为第 n 个道路绿化带前方监测的噪声值,L_n 为第 n 个道路绿化带后方监测的噪声值[17]。根据上述 4 个噪声指标分别得到最小声级噪声衰减率、最大声级噪声衰减率、等效声级噪声衰减率和声暴露级噪声衰减率,并进一步计算综合噪声衰减率(上述 4 个指标噪声衰减率之和)。

1.3 数据处理和分析

使用 EXCEL 2016 软件整理数据。使用 Origin 2021 软件绘图。使用 SPSS Statistics 25 软件进行单因素方差分析(one-way ANOVA),并采用 Duncan's 多重比较法检验不同配置模式和不同时间段道路绿化带降噪效能的差异。

使用 R 4.4.1 软件中的 randomForest 包对所有影响道路绿化带降噪效能的潜在变量包括绿化带结构特征因子(宽度、叶面积指数、高度、枝下高、物种丰富度指数、Simpson 多样性指数、Shannon 多样性指数和 Pielou 均匀度指数)和环境因子(风速、温度和湿度)进行随机森林回归分析,得到各潜在变量的相对重要值,其中,方差解释率代表模型对潜在变量变异性的解释度[18-19]。使用 Origin 2021 软件中的 Pearson 法对道路绿化带降噪效能的影响因子与各水平噪声衰减率进行相关性分析。

2 结果和分析

2.1 道路绿化带植物群落物种组成

调查和统计(附表 1)结果:广州道路绿化带植物种类丰富,包括 42 科 68 属 81 种(含种下等级,下同),其中,乔木 29 种、灌木 34 种、草本 18 种。不同道路绿化带乔木层、灌木层和草本层的物种组成具有明显的差异性,乔木层主要物种为小叶榄仁(*Terminalia neotaliala* Capuron)、垂叶榕(*Ficus benjamina* Linn.)、乌墨〔*Syzygium cumini*(Linn.)Skeels〕、榕树(*Ficus microcarpa* Linn. f.);灌木层主要物种为朱蕉〔*Cordyline fruticosa*(Linn.)A. Chev.〕、鹅掌柴〔*Heptapleurum heptaphyllum*(Linn.)Y. F. Deng〕、朱槿(*Hibiscus rosa-sinensis* Linn.)、棕竹〔*Rhapis excelsaa*(Thunb.)A. Henry〕;草本层主要物种为蓝花草(*Ruellia brittoniana* Leonard)、细叶结缕草〔*Zoysia pacifica*(Goudswaard)M. Hotta et S. Kuroki〕、地毯草〔*Axonopus compressus*(Sw.)P. Beauv.〕、山菅兰〔*Dianella ensifolia*(Linn.)DC.〕。

结果(表 2)显示:各道路绿化带形态结构多样,群落物种多样性存在一定差异。其中,叶面积指数为 0.73~4.45,绿化带高度为 0.76~10.30 m,枝下高为 0.80~7.77 m,重要值为 0.16~0.58,物种丰富度指数为 2~11,Simpson 多样性指数为 0.02~0.77,Shannon 多样性指数为 0.07~1.51,Pielou 均匀度指数为0.04~0.82。在环境因子方面,风速均小于 1.36 m·s^{-1},温度为 22.60~38.83 ℃,湿度为 41.33%~71.00%。

表 2　广州道路绿化带植物群落基本特征[1)]
Table 2　Basic characteristics of plant communities in roadside green belts of Guangzhou City[1)]

GB	LAI	h/m	h_1/m	IV	R	D	H'	E	v/(m · s^{-1})	t/℃	H/%
C1	2.75	1.43		0.43	5	0.67	1.18	0.73	0.06	31.40	45.00
C2	2.11	4.59	2.90	0.25	5	0.60	1.14	0.71	0.00	31.13	41.33
C3	3.08	4.08	6.20	0.28	5	0.58	0.98	0.61	0.18	30.30	62.00
C4	3.10	4.40	4.53	0.28	4	0.21	0.44	0.32	0.00	33.67	53.00
C5	4.13	4.83	3.93	0.31	4	0.39	0.61	0.44	0.03	34.47	50.00
C6	2.44	4.46	5.53	0.24	6	0.32	0.65	0.36	0.00	30.77	65.00
C7	1.85	2.98	7.30	0.19	7	0.57	1.13	0.58	0.32	26.43	53.00
C8	1.53	3.88	2.12	0.20	7	0.70	1.29	0.66	0.13	29.13	51.00
C9	0.73	1.73	0.98	0.28	5	0.71	1.32	0.82	0.26	31.63	63.67
C10	1.72	3.33	3.25	0.30	4	0.51	0.73	0.53	0.14	31.30	63.33
C11	4.45	1.26	1.65	0.31	5	0.54	0.88	0.55	0.05	38.83	50.00
C12	2.02	5.60	3.30	0.36	3	0.08	0.20	0.18	0.08	36.73	61.00
C13	4.45	4.34	2.30	0.37	4	0.21	0.45	0.32	0.59	33.53	67.33
C14	4.27	2.27	1.27	0.24	6	0.50	0.77	0.43	0.59	33.53	67.33
C15	0.73	6.06	2.98	0.22	5	0.32	0.52	0.32	0.56	35.40	53.00
C16	3.96	1.87	0.80	0.34	6	0.36	0.65	0.36	0.04	37.50	59.67
C17	0.73	6.86	3.45	0.45	3	0.04	0.11	0.10	0.22	35.00	53.67
C18	1.93	4.03	4.85	0.26	6	0.24	0.51	0.28	0.42	34.20	54.00
C19	1.93	6.08	2.76	0.23	6	0.02	0.07	0.04	1.36	35.37	53.00
C20	2.83	6.49	4.57	0.20	6	0.51	0.79	0.44	1.04	32.23	65.67
C21	2.40	0.76		0.44	6	0.40	0.80	0.45	0.41	32.20	56.00
C22	2.40	1.02		0.56	3	0.19	0.40	0.37	0.28	25.50	66.33
C23	2.40	10.30	2.93	0.52	2	0.07	0.15	0.22	0.16	24.20	63.00
C24	1.48	6.83	2.38	0.36	3	0.31	0.50	0.46	0.47	22.60	65.33
C25	1.48	2.55	2.50	0.32	4	0.55	0.94	0.68	0.47	22.60	65.33
C26	1.03	6.14	7.77	0.29	4	0.37	0.65	0.47	0.50	25.83	69.00
C27	1.24	2.60	7.10	0.30	5	0.54	0.89	0.56	0.92	26.40	69.00
C28	1.01	2.79	2.83	0.24	7	0.52	0.88	0.45	0.49	31.13	64.00
C29	1.95	2.01	2.77	0.16	9	0.69	1.35	0.61	0.55	29.83	69.67
C30	2.54	1.95	4.15	0.23	8	0.77	1.51	0.73	0.00	29.57	65.47
C31	2.40	1.80	2.20	0.58	2	0.03	0.07	0.10	0.00	37.73	57.00
C32	1.89	6.08	5.15	0.37	3	0.51	0.69	0.63	0.00	28.37	66.67
C33	2.65	2.67	2.80	0.22	7	0.61	1.15	0.59	0.00	28.40	71.00
C34	2.01	6.33	6.73	0.16	10	0.56	1.12	0.49	0.00	28.40	71.00
C35	2.65	2.38	2.03	0.20	11	0.44	0.89	0.37	0.00	28.40	71.00
C36	2.25	3.14	7.25	0.19	8	0.62	1.18	0.57	0.00	33.67	55.33
C37	3.71	7.64	2.02	0.26	4	0.63	1.12	0.81	0.13	29.30	62.67
C38	2.82	0.77		0.30	8	0.71	1.42	0.65	0.94	32.43	59.00
C39	1.23	4.29	6.23	0.17	8	0.30	0.61	0.29	0.42	31.47	63.67
C40	1.42	9.80	2.50	0.51	2	0.07	0.16	0.24	0.23	31.70	64.00

[1)] GB：绿化带编号 No. of green belt；LAI：叶面积指数 Leaf area index；h：绿化带高度 Green belt height；h_1：枝下高 Height under branch；IV：重要值 Importance value；R：物种丰富度指数 Species richness index；D：Simpson 多样性指数 Simpson diversity index；H'：Shannon 多样性指数 Shannon diversity index；E：Pielou 均匀度指数 Pielou evenness index；v：风速 Wind speed；t：温度 Temperature；H：湿度 Humidity.

2.2　不同时间段道路绿化带降噪效能差异

结果(表 3)显示：广州各道路绿化带对噪声具有一定程度的消减作用，其中，绿化带 C1、C6、C9 至 C11、C17、C31、C33 在高峰期的最小声级噪声衰减率、最大声级噪声衰减率、等效声级噪声衰减率和声暴露级噪声衰减率均高于平峰期。总体上看，绿化带 C1 至 C12 和 C17 至 C23 在平峰期的最大声级噪声衰减率、等效声级噪声衰减率和声暴露级噪声衰减率变化幅度较小。从综合噪声衰减率看，绿化带 C6、C11 至 C14、C26、C27 在高峰期的降噪效能较好(综合噪声衰减率大于 0.50)，绿化带 C14、C26、C37、C38 在平峰期的降噪效能较好。

表3　不同时间段广州道路绿化带的噪声衰减率($\bar{X}\pm SE$)[1)]
Table 3　Noise attenuation rate of roadside green belts of Guangzhou City at different time periods ($\bar{X}\pm SE$)[1)]

绿化带编号 No. of green belt	高峰期的噪声衰减率 Noise attenuation rate at peak period					平峰期的噪声衰减率 Noise attenuation rate at off-peak period				
	$R_{L_{min}}$	$R_{L_{max}}$	$R_{L_{eq}}$	R_{SEL}	R_{com}	$R_{L_{min}}$	$R_{L_{max}}$	$R_{L_{eq}}$	R_{SEL}	R_{com}
C1	0.11±0.01	0.13±0.02	0.11±0.02	0.08±0.01	0.43±0.04	0.09±0.01	0.07±0.01	0.08±0.02	0.06±0.01	0.31±0.05
C2	0.10±0.01	0.08±0.02	0.09±0.01	0.06±0.01	0.32±0.04	0.10±0.02	0.04±0.01	0.09±0.02	0.06±0.01	0.29±0.04
C3	0.07±0.01	0.17±0.02	0.10±0.01	0.07±0.01	0.41±0.05	0.12±0.01	0.11±0.02	0.10±0.01	0.08±0.01	0.40±0.03
C4	0.09±0.01	0.01±0.02	0.02±0.02	0.02±0.01	0.03±0.05	0.05±0.01	0.08±0.02	0.05±0.01	0.04±0.00	0.20±0.03
C5	0.10±0.02	0.12±0.03	0.07±0.01	0.06±0.01	0.35±0.05	0.10±0.02	0.09±0.03	0.09±0.02	0.07±0.01	0.35±0.06
C6	0.34±0.16	0.32±0.07	0.47±0.06	0.30±0.05	1.43±0.22	0.07±0.01	0.06±0.02	0.07±0.01	0.05±0.01	0.25±0.03
C7	0.08±0.02	0.08±0.03	0.06±0.01	0.04±0.01	0.24±0.05	0.07±0.02	0.06±0.02	0.08±0.01	0.06±0.01	0.28±0.04
C8	0.05±0.02	0.13±0.04	0.09±0.02	0.06±0.01	0.31±0.06	0.08±0.02	0.04±0.01	0.08±0.02	0.06±0.01	0.26±0.05
C9	0.10±0.02	0.09±0.03	0.07±0.06	0.10±0.03	0.31±0.14	0.07±0.03	0.07±0.02	0.05±0.02	0.02±0.01	0.17±0.04
C10	0.08±0.02	0.12±0.04	0.06±0.03	0.04±0.02	0.31±0.09	0.07±0.02	0.06±0.02	0.04±0.01	0.03±0.01	0.18±0.03
C11	0.14±0.03	0.13±0.04	0.17±0.03	0.12±0.02	0.56±0.11	0.11±0.03	0.05±0.02	0.04±0.02	0.04±0.01	0.21±0.05
C12	0.07±0.02	0.29±0.08	0.23±0.06	0.18±0.04	0.75±0.19	0.07±0.02	0.09±0.03	0.04±0.01	0.04±0.02	0.21±0.04
C13	0.08±0.02	0.29±0.07	0.24±0.10	0.19±0.15	0.66±0.31	—	0.07±0.05	—	0.03±0.04	0.02±0.02
C14	0.09±0.03	0.23±0.04	0.26±0.06	0.22±0.06	0.74±0.16	0.10±0.03	0.40±0.07	0.30±0.06	0.30±0.06	1.10±0.14
C15	0.05±0.01	0.07±0.03	0.06±0.01	0.03±0.01	0.19±0.04	—	0.18±0.08	0.04±0.03	0.03±0.02	0.23±0.13
C16	0.09±0.01	0.09±0.04	0.08±0.04	0.10±0.03	0.28±0.10	0.06±0.02	0.13±0.03	0.11±0.03	0.08±0.02	0.39±0.06
C17	0.12±0.02	0.08±0.02	0.07±0.04	0.07±0.02	0.34±0.09	0.06±0.02	0.04±0.02	0.05±0.03	0.04±0.03	0.12±0.03
C18	0.09±0.01	0.08±0.04	0.08±0.03	0.07±0.02	0.31±0.08	0.11±0.04	0.08±0.02	0.04±0.01	0.05±0.03	0.28±0.04
C19	0.07±0.02	0.11±0.02	0.13±0.02	0.10±0.02	0.41±0.05	0.11±0.02	0.07±0.01	0.05±0.01	0.05±0.01	0.27±0.03
C20	0.06±0.02	0.05±0.01	0.09±0.01	0.04±0.01	0.24±0.03	0.10±0.03	0.03±0.01	0.05±0.01	0.03±0.01	0.21±0.04
C21	0.08±0.01	0.09±0.03	0.08±0.01	0.07±0.01	0.32±0.05	0.17±0.03	0.08±0.03	0.04±0.01	0.03±0.01	0.30±0.03
C22	0.03±0.01	0.05±0.02	0.03±0.01	0.02±0.01	0.13±0.02	0.05±0.01	0.12±0.03	0.05±0.02	0.04±0.01	0.23±0.05
C23	0.04±0.01	0.07±0.01	0.05±0.01	0.04±0.00	0.20±0.02	0.03±0.01	0.08±0.01	0.05±0.01	0.04±0.00	0.19±0.02
C24	0.03±0.01	0.13±0.02	0.11±0.01	0.09±0.01	0.36±0.04	0.09±0.02	0.17±0.02	0.13±0.01	0.10±0.01	0.49±0.04
C25	0.06±0.01	0.16±0.02	0.12±0.02	0.10±0.01	0.44±0.05	0.06±0.02	0.18±0.04	0.15±0.01	0.12±0.01	0.49±0.07
C26	0.09±0.03	0.16±0.03	0.15±0.02	0.12±0.01	0.53±0.07	0.11±0.02	0.19±0.03	0.13±0.02	0.10±0.02	0.53±0.08
C27	0.10±0.03	0.17±0.02	0.15±0.02	0.11±0.01	0.52±0.06	0.11±0.02	0.12±0.02	0.11±0.02	0.09±0.02	0.43±0.07
C28	0.05±0.01	0.13±0.03	0.11±0.02	0.10±0.02	0.39±0.08	0.08±0.02	0.17±0.03	0.13±0.02	0.10±0.02	0.47±0.07
C29	0.05±0.01	0.07±0.03	0.04±0.01	0.04±0.01	0.17±0.04	0.06±0.01	0.14±0.02	0.14±0.02	0.10±0.02	0.43±0.05
C30	0.08±0.02	0.11±0.03	0.10±0.02	0.06±0.01	0.35±0.04	0.06±0.02	0.12±0.01	0.10±0.01	0.08±0.01	0.38±0.03
C31	0.04±0.01	0.10±0.04	0.07±0.02	0.05±0.01	0.26±0.08	0.03±0.01	0.05±0.01	0.03±0.01	0.03±0.00	0.13±0.01
C32	0.09±0.02	0.08±0.02	0.06±0.01	0.04±0.01	0.27±0.06	0.07±0.03	0.08±0.02	0.07±0.01	0.05±0.01	0.27±0.05
C33	0.13±0.02	0.14±0.03	0.12±0.01	0.09±0.01	0.48±0.05	0.09±0.03	0.05±0.02	0.09±0.01	0.06±0.01	0.29±0.06
C34	0.08±0.03	0.08±0.03	0.08±0.03	0.06±0.03	0.30±0.07	0.16±0.03	0.07±0.01	0.11±0.02	0.07±0.01	0.41±0.06
C35	0.08±0.02	0.03±0.02	0.01±0.03	0.01±0.02	0.04±0.02	0.10±0.03	0.06±0.02	0.07±0.02	0.05±0.01	0.23±0.05
C36	0.06±0.01	0.04±0.01	0.04±0.01	0.04±0.01	0.16±0.04	0.06±0.01	0.08±0.02	0.11±0.02	0.09±0.02	0.33±0.05
C37	0.09±0.09	0.10±0.06	0.10±0.10	0.07±0.06	0.31±0.06	0.11±0.11	0.18±0.18	0.13±0.13	0.09±0.09	0.51±0.10
C38	0.06±0.01	0.02±0.01	0.06±0.02	0.05±0.01	0.17±0.03	0.16±0.06	0.19±0.05	0.11±0.04	0.08±0.03	0.54±0.12
C39	0.16±0.03	0.09±0.03	0.08±0.02	0.06±0.02	0.38±0.06	0.03±0.01	0.10±0.04	0.11±0.03	0.09±0.02	0.31±0.09
C40	0.08±0.02	0.12±0.04	0.09±0.02	0.06±0.01	0.33±0.05	0.06±0.01	0.13±0.03	0.10±0.03	0.07±0.02	0.36±0.08
均值 Average	0.09±0.01	0.12±0.01	0.10±0.01	0.08±0.01	0.37±0.04	0.08±0.01	0.10±0.01	0.09±0.01	0.07±0.01	0.33±0.03

[1)] $R_{L_{min}}$：最小声级噪声衰减率 Noise attenuation rate of the minimum sound level；$R_{L_{max}}$：最大声级噪声衰减率 Noise attenuation rate of the maximum sound level；$R_{L_{eq}}$：等效声级噪声衰减率 Niose attenuation rate of the equivalent sound level；R_{SEL}：声暴露级噪声衰减率 Noise attenuation rate of the sound exposure level；R_{com}：综合噪声衰减率 Comprehensive noise attenuation rate. —：由于外界干扰，数据出现负值，不作统计 Due to external interference, the data show negative values and will not be included in the statistics.

单因素方差分析结果显示：从不同时间段看，高峰期和平峰期道路绿化带对噪声的消减作用具有一定差异，但差异不显著，高峰期最小声级噪声衰减率、最大声级噪声衰减率、等效声级噪声衰减率、声暴露级噪声衰减率和综合噪声衰减率的均值均高于平峰期。

2.3 不同配置模式道路绿化带降噪效能差异

结果(表 4)显示：从植物群落配置看，“乔+灌+草”、“乔+灌”、“灌+草”、“灌木”模式道路绿化带的噪声衰减率存在一定差异。最小声级噪声衰减率、最大声级噪声衰减率、等效声级噪声衰减率和声暴露级噪声衰减率由高至低均依次为“乔+灌+草”模式、“乔+灌”模式、“灌+草”模式、“灌木”模式。从综合噪声衰减率看，“乔+灌+草”模式对噪声的衰减程度最高(0.37)，“灌木”模式最低(0.22)。单因素方差分析结果显示不同模式间的差异不显著。

2.4 道路绿化带噪声衰减率影响因子的重要性分析

高峰期和平峰期道路绿化带噪声衰减率影响因子的相对重要值见表 5。结果显示：在高峰期，各影响因子对最大声级噪声衰减率、等效声级噪声衰减率和综合噪声衰减率的重要性均达到极显著($P<0.01$)或显著($P<0.05$)水平，对应的方差解释率分别为 22.40%、33.00% 和 29.76%，而最小声级噪声衰减率和声暴露级噪声衰减率的方差解释率较低，分别为 6.00% 和 6.50%；其中，枝下高、叶面积指数、湿度是高峰期道路绿化带综合噪声衰减率的关键影响因子，相对重要值分别为 16.15%、15.42%、15.40%。在平峰期，各影响因子对最小声级噪声衰减率、最大声级噪声衰减率、等效声级噪声衰减率、声暴露级噪声衰减率和综合噪声衰减率的重要性均达到极显著或显著水平，对应的方差解释率分别为 17.40%、36.90%、37.60%、43.80% 和 50.16%；其中，Simpson 多样性指数、叶面积指数、Shannon 多样性指数和 Pielou 均匀度指数的相对重要值分别为 17.71%、16.87%、

表 4　不同配置模式广州道路绿化带噪声衰减率($\bar{X}\pm SE$)
Table 4　Noise attenuation rate of roadside green belts of Guangzhou City under different configuration patterns ($\bar{X}\pm SE$)

配置模式 Configuration pattern	噪声衰减率 Noise attenuation rate				
	最小声级 Minimum sound level	最大声级 Maximum sound level	等效声级 Equivalent sound level	声暴露级 Sound exposure level	综合 Comprehensive
乔+灌+草 Tree+shrub+grass	0.10±0.01	0.12±0.01	0.11±0.01	0.08±0.01	0.37±0.03
乔+灌 Tree+shrub	0.08±0.00	0.10±0.01	0.10±0.01	0.07±0.01	0.31±0.03
灌+草 Shrub+grass	0.07±0.01	0.09±0.03	0.09±0.01	0.06±0.01	0.32±0.06
灌木 Shrub	0.07±0.02	0.07±0.01	0.05±0.01	0.04±0.01	0.22±0.04

表 5　广州不同时间段道路绿化带噪声衰减率影响因子的相对重要值[1)]
Table 5　Relative importance value of the influence factors of noise attenuation rate in roadside green belts at different time periods of Guangzhou City[1)]

噪声衰减率 Noise attenuation rate	高峰期各影响因子的相对重要值/% The relative importance value of the influence factors at peak period											VE/%
	d	LAI	h	h_1	R	D	H'	E	v	t	H	
$R_{L_{min}}$	10.26 **	3.23	4.31	11.85 **	8.11 **	7.83 **	6.70 **	7.23 **	5.15 *	9.07 **	4.94	6.00
$R_{L_{max}}$	18.58 **	21.70 **	13.59 **	16.44 **	16.25 **	13.09 **	11.75 **	15.95 **	13.79 **	17.75 **	19.83 **	22.40
$R_{L_{eq}}$	14.13 **	17.29 **	11.52 **	17.17 **	11.66 **	9.57 **	9.10 *	12.09 **	13.50 **	13.05 **	16.51 **	33.00
R_{SEL}	13.99 **	5.48	11.59 **	14.89 **	13.13 **	11.04 **	10.94 **	12.61 **	7.59 *	12.44 **	12.25 **	6.50
R_{com}	12.77 **	15.42 **	11.17 **	16.15 **	13.92 **	10.73 **	10.46 **	12.11 **	11.84 **	12.30 **	15.40 **	29.76

噪声衰减率 Noise attenuation rate	平峰期各影响因子的相对重要值/% The relative importance value of the influence factors at off-peak period											VE/%
	d	LAI	h	h_1	R	D	H'	E	v	t	H	
$R_{L_{min}}$	16.61 **	10.83 **	16.43 **	15.11 **	11.99 *	15.18 **	15.82 **	14.28 **	14.86 **	12.91 **	14.09 **	17.40
$R_{L_{max}}$	10.46 *	17.40 **	9.71 *	8.66 **	10.34 *	17.92 **	14.07 **	17.75 **	12.93 **	13.07 **	12.74 **	36.90
$R_{L_{eq}}$	12.14 **	17.58 **	8.73 *	9.49 **	9.66 **	19.08 **	14.74 **	17.18 **	11.77 **	11.66 **	11.15 **	37.60
R_{SEL}	11.66 **	17.30 **	9.18 **	10.06 **	8.45 *	17.45 **	14.23 **	17.61 **	11.02 **	13.50 **	12.10 **	43.80
R_{com}	11.92 **	16.87 **	9.36 *	9.23 **	8.33 *	17.71 **	15.90 **	15.67 **	12.23 **	11.93 **	12.20 **	50.16

[1)] $R_{L_{min}}$：最小声级噪声衰减率 Noise attenuation rate of the minimum sound level；$R_{L_{max}}$：最大声级噪声衰减率 Noise attenuation rate of the maximum sound level；$R_{L_{eq}}$：等效声级噪声衰减率 Niose attenuation rate of the equivalent sound level；R_{SEL}：声暴露级噪声衰减率 Noise attenuation rate of the sound exposure level；R_{com}：综合噪声衰减率 Comprehensive noise attenuation rate. d：绿化带宽度 Green belt width；LAI：叶面积指数 Leaf area index；h：绿化带高度 Green belt height；h_1：枝下高 Height under branch；R：物种丰富度指数 Species richness index；D：Simpson 多样性指数 Simpson diversity index；H'：Shannon 多样性指数 Shannon diversity index；E：Pielou 均匀度指数 Pielou evenness index；v：风速 Wind speed；t：温度 Temperature；H：湿度 Humidity. VE：方差解释率 Variance explanation rate. *：$P<0.05$；**：$P<0.01$.

15.90%、15.67%，是平峰期道路绿化带综合噪声衰减率的关键影响因子。

2.5 道路绿化带噪声衰减率与影响因子的关系

高峰期和平峰期道路绿化带噪声衰减率与影响因子的相关性分析见表 6。结果显示：在高峰期，最小声级噪声衰减率与绿化带宽度、叶面积指数及群落物种多样性指数（物种丰富度指数、Simpson 多样性指数、Shannon 多样性指数和 Pielou 均匀度指数）呈极显著（$P<0.01$）正相关，而与道路绿化带高度、风速、湿度呈极显著或显著（$P<0.05$）负相关；最大声级噪声衰减率、等效声级噪声衰减率、声暴露级噪声衰减率和综合噪声衰减率均与道路绿化带宽度、叶面积指数、Pielou 均匀度指数、湿度呈极显著或显著正相关，而与枝下高呈极显著或显著负相关。在平峰期，各噪声指标衰减率均与道路绿化带宽度、叶面积指数及群落物种多样性指数呈极显著或显著正相关；除最小声级噪声衰减率外的其余 4 个噪声指标衰减率与湿度呈极显著正相关。

从综合降噪效能看，高峰期与平峰期道路绿化带降噪效能的关键影响因子略有差异，高峰期绿化带宽度越宽、叶面积指数和 Pielou 均匀度指数越高、湿度越大、枝下高越小对噪声的消减作用越明显；平峰期绿化带宽度越宽、叶面积指数和群落物种多样性指数越高、湿度越大对噪声的消减作用越明显。

表 6 广州不同时间段道路绿化带噪声衰减率与影响因子的相关性分析1)
Table 6 Analysis on correlation between noise attenuation rate and influence factors of roadside green belts at different time periods of Guangzhou City1)

噪声衰减率 Noise attenuation rate	高峰期的相关系数 Correlation coefficient at peak period										
	d	LAI	h	h_1	R	D	H'	E	v	t	H
$R_{L_{min}}$	0.58 **	0.51 **	−0.38 *	−0.24	0.73 **	0.53 **	0.57 **	0.56 **	−0.34 *	0.15	−0.52 **
$R_{L_{max}}$	0.41 *	0.55 **	−0.37	−0.43 *	0.17	0.31	0.23	0.41 *	−0.12	0.33	0.53 **
$R_{L_{eq}}$	0.44 *	0.69 **	−0.21	−0.46 *	0.30	0.32	0.17	0.45 *	−0.16	0.49 **	0.64 **
R_{SEL}	0.43 *	0.44 *	−0.22	−0.50 **	0.07	0.34	0.16	0.42 *	−0.09	0.38 *	0.42 *
R_{com}	0.37 *	0.63 **	−0.26	−0.39 *	0.23	0.29	0.18	0.47 *	−0.09	0.26	0.44 *
噪声衰减率 Noise attenuation rate	平峰期的相关系数 Correlation coefficient at off-peak period										
	d	LAI	h	h_1	R	D	H'	E	v	t	H
$R_{L_{min}}$	0.65 **	0.46 *	−0.31	−0.52 **	0.55 **	0.60 **	0.61 **	0.59 **	0.36 *	0.26	0.07
$R_{L_{max}}$	0.42 *	0.45 *	−0.42 *	−0.26	0.49 **	0.42 *	0.46 **	0.46 **	0.63 **	0.29	0.51 **
$R_{L_{eq}}$	0.58 **	0.44 *	−0.30	−0.28	0.68 **	0.66 **	0.61 **	0.58 **	0.24	0.03	0.55 **
R_{SEL}	0.50 **	0.53 **	−0.44 *	−0.19	0.67 **	0.54 **	0.61 **	0.46 **	0.24	0.11	0.48 **
R_{com}	0.61 **	0.54 **	−0.29	−0.28	0.68 **	0.62 **	0.69 **	0.64 **	0.11	0.18	0.45 **

1) $R_{L_{min}}$：最小声级噪声衰减率 Noise attenuation rate of the minimum sound level；$R_{L_{max}}$：最大声级噪声衰减率 Noise attenuation rate of the maximum sound level；$R_{L_{eq}}$：等效声级噪声衰减率 Niose attenuation rate of the equivalent sound level；R_{SEL}：声暴露级噪声衰减率 Noise attenuation rate of the sound exposure level；R_{com}：综合噪声衰减率 Comprehensive noise attenuation rate. d：绿化带宽度 Green belt width；LAI：叶面积指数 Leaf area index；h：绿化带高度 Green belt height；h_1：枝下高 Height under branch；R：物种丰富度指数 Species richness index；D：Simpson 多样性指数 Simpson diversity index；H'：Shannon 多样性指数 Shannon diversity index；E：Pielou 均匀度指数 Pielou evenness index；v：风速 Wind speed；t：温度 Temperature；H：湿度 Humidity. *：$P<0.05$；**：$P<0.01$.

3 讨 论

3.1 不同配置模式道路绿化带的降噪效能

城市道路绿化带是利用植物叶片、枝干等器官结构对声能产生吸收、反射和衍射作用，从而达到噪声衰减的效果[11]。然而，不同配置模式道路绿化带对噪声的衰减作用存在较大差异[9]155-156,[20]51-52。范昕婷[20]38-39发现“乔+灌+草”型复层结构绿化带的降噪效能最好。本研究中，“乔+灌+草”模式绿化带的最小声级噪声衰减率、最大声级噪声衰减率、等效声级噪声衰减率、声暴露级噪声衰减率、综合噪声衰减率均最大，降噪效能最优，研究结果与范昕婷[20]38-39一致。这可能是由于相较于其他配置模式，“乔+灌+草”模式道路绿化带的植被结构复杂、形式多样，在立体空间上各层次紧密结合，群落稳定性较强，能够对噪声产生明显的衰减作用[21],[22]72。Ow 等[23]通过 3D 模拟发现，多层次结构植物群落的降噪效能较优，进一步佐证了文中的结果。此外，本研究还发现道路绿化带在高峰期的各水平噪声衰减率均高于平峰期，

高峰期降噪效能优于平峰期,这可能是由于高峰期噪声频率波动范围更大且主要处于高频波段,而道路绿化带的降噪效能在高频段内更明显[24-25]。

3.2　道路绿化带降噪效能的关键影响因子

当道路绿化带配置模式发生改变时,道路绿化带对噪声的衰减作用随之改变,影响绿化带降噪效果的关键因子也会改变[24-25]。温度、湿度和风速等环境因子主要通过间接改变大气介质影响声音传播的途径,进而对噪声产生衰减作用,因此环境因子对噪声消减作用的不确定性较高,植被结构特征因子对噪声衰减的贡献往往要强于环境因子[11,26]。本研究结果与上述结果相符,高峰期道路绿化带枝下高和叶面积指数对综合噪声衰减率的相对重要值大于环境因子,平峰期道路绿化带的叶面积指数、Simpson 多样性指数、Shannon 多样性指数和 Pielou 均匀度指数对综合噪声衰减率的相对重要值大于环境因子。这可能是因为高峰期噪声强度大,道路绿化带枝下高越低、叶面积指数越高时易形成致密的物理声屏障,以吸收和反射声波;平峰期则依赖多层次植被结构(叶面积指数、群落物种多样性指数)增强噪声衰减效果[8]。相关性分析结果显示:高峰期和平峰期道路绿化带宽度越宽、叶面积指数和 Pielou 均匀度指数越高,综合降噪效能越好。究其原因,一方面是因为道路绿化带宽度增加时,植物对声波吸收反射作用的次数增加,噪声衰减率增大[27];另一方面,当植被生长越茂密,植物群落物种组成越丰富、分布越均匀时,其对噪声产生衰减作用的植物物种数量增加,且群落整体吸声特性增强,降噪效能较好[21]。因此,道路绿化带宽度越大,“乔+灌+草”复层结构越紧实,物种丰富度越高,物种密度越大,其对噪声的消减作用越明显[8],[9]158。

3.3　道路绿化带降噪物种的筛选

在“乔+灌+草”模式下,植物群落形态结构特征的差异会进一步影响绿化带整体的降噪效能。为了充分发挥道路绿化带在垂直结构上的最优降噪效能,合理筛选乔木层、灌木层和草本层植物显得尤为重要。调查结果表明:乔木层数量较多的植物有小叶榄仁、垂叶榕、乌墨、榕树,这些物种具备冠幅和胸高断面积较大,枝叶繁茂的典型特征,有利于增强对噪声的衰减作用[13],并且占据绿化带较高处的冠层空间。因此,在筛选乔木层物种时应选择枝叶茂密、长势良好的物种,使其能够更有效地阻挡高处噪声的传播。灌木层植物是阻挡噪声传播的关键,灌木层数量较多的植物有朱蕉、鹅掌柴、朱槿、棕竹,这些物种具有叶片数量多、叶表面被毛、质地厚且分枝低的特征,对噪声的衰减作用较强[22]71,[28]。草本层植被主要对噪声的声波产生漫反射作用,在叶片形状方面,狭长形叶片对噪声的衰减作用较强[25],本研究发现草本层频度较高的蓝花草、细叶结缕草、地毯草、山菅兰也具有叶片狭长且生长密集的特征,有助于提升降噪效能。

4　结　　论

“乔+灌+草”型植物群落配置模式道路绿化带的降噪效能最优;高峰期道路绿化带的降噪效能整体优于平峰期,枝下高、叶面积指数、湿度是影响高峰期道路绿化带降噪效能的关键因子,平峰期道路绿化带降噪效果主要受 Simpson 多样性指数、叶面积指数、Shannon 多样性指数和 Pielou 均匀度指数的影响;在“乔+灌+草”模式下,乔木层可选择小叶榄仁、垂叶榕、乌墨、榕树等冠幅和胸高断面积较大且枝叶繁茂的物种;灌木层可选择朱蕉、鹅掌柴、朱槿、棕竹等叶片数量多、叶表面被毛、质地厚且分枝低的物种;草本层可选择蓝花草、细叶结缕草、地毯草、山菅兰等叶片狭长且生长密集的物种。

参考文献:

[1] ERIKSSON C, BODIN T, SELANDER J. Burden of disease from road traffic and railway noise: a quantification of healthy life years lost in Sweden[J]. Scandinavian Journal of Work Environment and Health, 2017, 43(6): 519-525.

[2] YASIN I, WIDARYANTO L H, SUTRISNO W. The technique of green belt bamboo constructions for highway noise effect reductions[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2020, 1456: 012006.

[3] 蒲　琪. 深圳快速路及主干道交通噪声对其周边建筑的影响研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2016: 7-8.

[4] WANG Y C. Carbon sequestration and foliar dust retention by woody plants in the greenbelts along two major Taiwan highways[J]. Annals of Applied Biology, 2011, 159: 244-251.

[5] VEISTEN K, SMYRONVA Y, KLEBOLE R, et al. Valuation of green walls and green roofs as soundscape measures: including monetised amenity values together with noise-attenuation values in a cost-benefit analysis of a green wall affecting courtyards[J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2012, 9: 3770-3788.

[6] DING L, VAN RENTERGHEM T, BOTTELDOOREN D, et al. Sound absorption of porous substrates covered by foliage: experimental results and numerical predictions[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 2013, 134(6): 4599-4609.

[7] ISLAM M N, RAHMAN K S, BAHAR M M. Pollution attenuation by roadside greenbelt in and around urban areas[J]. Urban Forestry and Urban Greening, 2012, 11: 460-464.

[8] LI M M, VAN RENTERGHEM T, KANG J, et al. Sound absorption by tree bark[J]. Applied Acoustics, 2020, 165: 107328.

[9] 李朦朦. 植物降噪原理及影响因素研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2021.

[10] LI M M, KANG J. Influence of leaf physical properties on single-leaf vibrational response to sound[J]. Forests, 2020, 11: 115.

[11] MORAKINYO T E, LAM Y F, HAO S. Evaluating the role of green infrastructures on near-road pollutant dispersion and removal: modelling and measurement[J]. Journal of Environmental Management, 2016, 182: 595-605.

[12] 孙 伟, 王玮璐, 郭小平, 等. 不同类型绿化带对交通噪声的衰减效果比较[J]. 植物资源与环境学报, 2014, 23(2): 87-93.

[13] 王 慧, 郭晋平, 张芸香, 等. 公路绿化带降噪效应及其影响因素研究[J]. 生态环境学报, 2010, 19(6): 1403-1408.

[14] 吴安驰, 邓湘雯, 任小丽, 等. 中国典型森林生态系统乔木层群落物种多样性的空间分布格局及其影响因素[J]. 生态学报, 2018, 38(21): 7727-7738.

[15] 苏香萍. 亚热带杉木林和天然次生林林下植被研究[D]. 合肥: 安徽农业大学, 2020: 14-15.

[16] 方精云, 沈泽昊, 唐志尧, 等. "中国山地植物物种多样性调查计划"及若干技术规范[J]. 生物多样性, 2004, 12(1): 5-9.

[17] 石 媚. 宁夏沿黄城市带道路景观林带植被特征及噪声消减研究[D]. 银川: 宁夏大学, 2022: 12-13.

[18] BREIMAN L. Random forests[J]. Machine Learning, 2001, 45: 5-32.

[19] CUTLER D R, JR T C E, BEARD K H, et al. Random forests for classification in ecology[J]. Ecology, 2007, 88(11): 2783-2792.

[20] 范昕婷. 上海市外环绿带不同植物群落生态功能研究[D]. 上海: 华东师范大学, 2013.

[21] MALEKI K, HOSSEINI S M, NASIRI P. The effect of pure and mixed plantations of *Robinia pseudoacasia* and *Rinus eldarica* on traffic noise decrease[J]. International Journal of Environmental Sciences, 2010, 1(2): 213-224.

[22] 刘佳妮. 园林植物降噪功能研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2007.

[23] OW L F, GHOSH S. Urban cities and road traffic noise: reduction through vegetation[J]. Applied Acoustics, 2017, 120: 15-20.

[24] YANG H-S, KANG J, CHEAL C. Random-incidence absorption and scattering coefficients of vegetation[J]. Acta Acustica United with Acustica, 2013, 99(3): 379-388.

[25] 曾 旸, 郭小平, 李雨珂, 等. 北京市3种配置模式绿化带降噪效果的空间变化规律[J]. 植物资源与环境学报, 2017, 26(2): 68-75.

[26] SINGH D, PRAKASHA A, SRIVASTAVA A K, et al. The effects of meteorological parameters in ambient noise modelling studies in Delhi[J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2013, 185(2): 1873-1882.

[27] KARBALAEI S S, KARIMI E, NAJI H R, et al. Investigation of the traffic noise attenuation provided by roadside green belts[J]. Fluctuation and Noise Letters, 2015, 14(4): 1550036.

[28] FAN Y, BAO Z Y, ZHU Z J, et al. The investigation of noise attenuation by plants and the corresponding noise-reducing spectrum[J]. Journal of Environmental Health, 2010, 72(8): 8-15.

(责任编辑: 郭严冬)

附表1 广州道路绿化带植物群落基本特征
Supplementary table 1 Basic characteristics of plant communities in roadside green belts of Guangzhou City

GB1)	物种 Species	CP2)
C1	垂叶榕-朱槿-假连翘-鹅掌柴+细叶结缕草 *Ficus benjamina-Hibiscus rosa-sinensis-Duranta erecta-Heptapleurum heptaphyllum+Zoysia pacifica*	灌+草 Shrub+grass
C2	乌墨+鹅掌柴-红背桂+山菅兰-蓝花草 *Syzygium cumini+Heptapleurum heptaphyllum-Excoecaria cochinchinensis+Dianella ensifolia-Ruellia simplex*	乔+灌+草 Tree+shrub+grass
C3	木棉+垂叶榕-红背桂+山菅兰-细叶结缕草 *Bombax ceiba+Ficus benjamina-Excoecaria cochinchinensis+Dianella ensifolia-Zoysia pacifica*	乔+灌+草 Tree+shrub+grass
C4	宫粉羊蹄甲+红背桂-夹竹桃+山菅兰 *Bauhinia variegata+Excoecaria cochinchinensis-Nerium oleander+Dianella ensifolia*	乔+灌+草 Tree+shrub+grass
C5	宫粉羊蹄甲-长叶榕+红背桂+蜘蛛抱蛋 *Bauhinia variegata-Ficus binnendijkii+Excoecaria cochinchinensis+Aspidistra elatior*	乔+灌+草 Tree+shrub+grass
C6	凤凰木+朱蕉-洒金变叶木-叶子花-牛蹄豆+蓝花草 *Delonix regia+Cordyline fruticosa-Codiaeum variegatum-Bougainvillea spectabilis-Pithecellobium dulce+Ruellia simplex*	乔+灌+草 Tree+shrub+grass
C7	凤凰木-小叶紫薇-木樨+软枝黄蝉-鹅掌柴+蓝花草-花叶艳山姜 *Delonix regia-Lagerstroemia parviflora-Osmanthus fragrans+Allamanda cathartica-Heptapleurum heptaphyllum+Ruellia simplex-Alpinia zerumbet* 'Variegata'	乔+灌+草 Tree+shrub+grass
C8	凤凰木-鸡蛋花+朱蕉-红果仔-棕竹+地毯草-蓝花草 *Delonix regia-Plumeria rubra+Cordyline fruticosa-Eugenia uniflora-Rhapis excelsa+Axonopus compressus-Ruellia simplex*	乔+灌+草 Tree+shrub+grass
C9	菲岛福木+朱蕉+地毯草-红花酢浆草-蓝花草 *Garcinia subelliptica+Cordyline fruticosa+Axonopus compressus-Oxalis corymbosa-Ruellia simplex*	乔+灌+草 Tree+shrub+grass
C10	宫粉羊蹄甲-木樨+朱蕉+蓝花草 *Bauhinia variegata-Osmanthus fragrans+Cordyline fruticosa+Ruellia simplex*	乔+灌+草 Tree+shrub+grass

续附表1　Supplementary table 1 (Continued)

GB[1)]	物种 Species	CP[2)]
C11	大花紫薇+榕树-基及树+合果芋-美人蕉 *Lagerstroemia speciosa+Ficus microcarpa-Carmona microphylla+Syngonium podophyllum-Canna indica*	乔+灌+草 Tree+shrub+grass
C12	构树-鸡冠刺桐+鹅掌柴 *Broussonetia papyrifera-Erythrina crista-galli+Heptapleurum heptaphyllum*	乔+灌 Tree+shrub
C13	澳洲鸭脚木+朱槿-凤尾竹+山菅兰 *Schefflera macrostachya+Hibiscus rosa-sinensis-Bambusa multiplex* f. *fernleaf+Dianella ensifolia*	乔+灌+草 Tree+shrub+grass
C14	刺葵-澳洲鸭脚木-小叶紫薇+凤尾竹-鹅掌柴-朱槿 *Phoenix loureiroi-Schefflera macrostachya-Lagerstroemia parviflora+Bambusa multiplex* f. *fernleaf-Heptapleurum heptaphyllum-Hibiscus rosa-sinensis*	乔+灌 Tree+shrub
C15	木棉-鸡蛋花-小叶紫薇+凤尾竹-鹅掌柴 *Bombax ceiba-Plumeria rubra-Lagerstroemia parviflora+Bambusa multiplex* f. *fernleaf-Heptapleurum heptaphyllum*	乔+灌 Tree+shrub
C16	木樨-榕树-垂叶榕+散尾葵-棕竹+水鬼蕉 *Osmanthus fragrans-Ficus microcarpa-Ficus benjamina+Dypsis lutescens-Rhapis excelsa+Hymenocallis littoralis*	乔+灌+草 Tree+shrub+grass
C17	乌墨+垂叶榕+蓝花草 *Syzygium cumini+Ficus benjamina+Ruellia simplex*	乔+灌+草 Tree+shrub+grass
C18	乌墨+散尾葵-垂叶榕-榕树-棕竹+蓝花草 *Syzygium cumini+Dypsis lutescens-Ficus benjamina-Ficus microcarpa-Rhapis excelsa+Ruellia simplex*	乔+灌+草 Tree+shrub+grass
C19	乌墨-大琴叶榕-鸡蛋花-木樨+垂叶榕+蓝花草 *Syzygium cumini-Ficus lyrata-Plumeria rubra-Osmanthus fragrans+Ficus benjamina+Ruellia simplex*	乔+灌+草 Tree+shrub+grass
C20	乌墨-鸡蛋花-蒲葵-木樨+棕竹-香龙血树 *Syzygium cumini-Plumeria rubra-Livistona chinensis-Osmanthus fragrans+Rhapis excelsa-Dracaena fragrans*	乔+灌 Tree+shrub
C21	假连翘-鹅掌柴-灰莉-红花檵木-朱槿-红背桂 *Duranta erecta-Heptapleurum heptaphyllum-Fagraea ceilanica-Loropetalum chinense-Hibiscus rosa-sinensis-Excoecaria cochinchinensis*	灌木 Shrub
C22	鹅掌柴-灰莉-米仔兰 *Heptapleurum heptaphyllum-Fagraea ceilanica-Aglaia odorata*	灌木 Shrub
C23	榕树+黄金榕 *Ficus microcarpa+Ficus microcarpa*	乔+灌 Tree+shrub
C24	高山榕+朱蕉-假连翘 *Ficus altissima+Cordyline fruticosa-Duranta erecta*	乔+灌 Tree+shrub
C25	高山榕+变叶木-朱蕉-假连翘 *Ficus altissima+Codiaeum variegatum-Cordyline fruticosa-Duranta erecta*	乔+灌 Tree+shrub
C26	小叶榄仁+朱蕉-鹅掌柴-朱槿 *Terminalia neotaliala+Cordyline fruticosa-Heptapleurum heptaphyllum-Hibiscus rosa-sinensis*	乔+灌 Tree+shrub
C27	小叶榄仁+朱槿-龙船花+毛蕨-山菅兰 *Terminalia neotaliala+Hibiscus rosa-sinensis-Ixora chinensis+Cyclosorus interruptus-Dianella ensifolia*	乔+灌+草 Tree+shrub+grass
C28	黄花风铃木-杧果+榕树-朱蕉-变叶珊瑚花+细叶结缕草-地毯草 *Handroanthus chrysanthus-Mangifera indica+Ficus microcarpa-Cordyline fruticosa-Jatropha integerrima+Zoysia pacifica-Axonopus compressus*	乔+灌+草 Tree+shrub+grass
C29	黄花风铃木-杧果+苏铁-朱蕉-鹅掌柴+蓝花草-地毯草-黄鹌菜-细叶结缕草 *Handroanthus chrysanthus-Mangifera indica+Cycas revoluta-Cordyline fruticosa-Heptapleurum heptaphyllum+Ruellia simplex-Axonopus compressus-Youngia japonica-Zoysia pacifica*	乔+灌+草 Tree+shrub+grass
C30	黄花风铃木-榕树+假连翘-三色千年木-鹅掌柴-红花檵木+地毯草-蓝花草 *Handroanthus chrysanthus-Ficus microcarpa+Duranta erecta-Dracaena marginata* ‘Tricolor’-*Heptapleurum heptaphyllum-Loropetalum chinense+Axonopus compressus-Ruellia simplex*	乔+灌+草 Tree+shrub+grass
C31	江边刺葵+三角梅 *Phoenix roebelenii+Bougainvillea glabra*	乔+灌 Tree+shrub
C32	黄樟+红背桂-鹅掌柴 *Camphora parthenoxylon+Excoecaria cochinchinensis-Heptapleurum heptaphyllum*	乔+灌 Tree+shrub
C33	高山榕+灰莉-木樨+巴西鸢尾-间型沿阶草-蓝花草-花叶艳山姜 *Ficus altissima+Fagraea ceilanica-Osmanthus fragrans+Neomarica gracilis-Ophiopogon intermedius-Ruellia simplex-Alpinia zerumbet* ‘Variegata’	乔+灌+草 Tree+shrub+grass
C34	小叶榄仁-榕树+棕竹-龙船花-银姬小蜡-变叶珊瑚花-假连翘+细叶结缕草-红花酢浆草-蓝花草 *Terminalia neotaliala-Ficus microcarpa+Rhapis excelsa-Ixora chinensis-Ligustrum sinense* var. *variegatum-Jatropha integerrima-Duranta erecta+Zoysia pacifica-Oxalis corymbosa-Ruellia simplex*	乔+灌+草 Tree+shrub+grass
C35	小叶榄仁-小叶紫薇-榕树+叶子花-灰莉-变叶珊瑚花-龙船花+金边龙舌兰-细叶结缕草-肾蕨-蓝花草 *Terminalia neotaliala-Lagerstroemia parviflora-Ficus microcarpa+Bougainvillea spectabilis-Fagraea ceilanica-Jatropha integerrima-Ixora chinensis+Agave americana* var. *marginata-Zoysia pacifica-Nephrolepis cordifolia-Ruellia simplex*	乔+灌+草 Tree+shrub+grass
C36	鸡蛋花-蒲葵+红花檵木-龙船花-假连翘+冷水花-地毯草-假蒟 *Plumeria rubra-Livistona chinensis+Loropetalum chinense-Ixora chinensis-Duranta erecta+Pilea notata-Axonopus compressus-Piper sarmentosum*	乔+灌+草 Tree+shrub+grass
C37	垂叶榕-幌伞枫+灰莉-朱缨花 *Ficus benjamina-Heteropanax fragrans+Fagraea ceilanica-Calliandra haematocephala*	乔+灌 Tree+shrub
C38	叶子花-花叶青木-红背桂-鹅掌柴-朱蕉-红花檵木-朱槿+黄纹万年麻 *Bougainvillea spectabilis-Aucuba japonica* var. *variegata-Excoecaria cochinchinensis-Heptapleurum heptaphyllum-Cordyline fruticosa-Loropetalum chinense-Hibiscus rosa-sinensis+Furcraea foetida* ‘Striata’	灌+草 Shrub+grass
C39	朴树-海南菜豆树-黑叶印度榕+朱缨花-红背桂-灰莉-九里香+蓝花草 *Celtis sinensis-Radermachera hainanensis-Ficus elastica* ‘Abidjan’+*Calliandra haematocephala-Excoecaria cochinchinensis-Fagraea ceilanica-Murraya exotica+Ruellia simplex*	乔+灌+草 Tree+shrub+grass
C40	榕树+朱缨花 *Ficus microcarpa+Calliandra haematocephala*	乔+灌 Tree+shrub

1) GB：绿化带编号 No. of green belt.

2) CP：配置模式 Configuration pattern.