

长江三角洲地区 11 个县(市、区)城市道路林带降噪能力及其影响因素

李亚楠¹, 黄绍荣², 格日乐图³, 严力蛟¹

(1. 浙江大学 生命科学学院, 浙江 杭州 310058; 2. 宁波市生态环境局 余姚分局, 浙江 余姚 315400;
3. 中国林业科学研究院 亚热带林业研究所, 浙江 杭州 311400)

摘要:【目的】城市交通噪声对城市居民生活品质的影响日益严重, 城市道路林带在衰减交通噪声方面优势明显。合理选取城市绿化带降噪能力衡量指标, 使城市绿化带建设能够达到最优降噪效果。【方法】选取长江三角洲地区 4 条纬度带上 11 个县(市、区)交通主干道的道路林带作为研究对象, 引入三维绿量作为衡量林带降噪能力的指标, 结合不同类型林带的占比、三维绿量值以及三维绿量值与乔木及乔木混交林枝下高, 综合对比分析林带降噪效果, 进行初步评估。【结果】11 个县(市、区)中南京玄武区、镇江润州区交通干道道路林带的降噪效果更优, 连云港连云区、丽水庆元县的交通干道道路林带的降噪效果较差。具有合理配置的乔灌混交林更利于降噪, 由模拟模型计算得到的 11 个县(市、区)的附加降噪量与统计获得的三维绿量之间呈正相关关系。【结论】林带三维绿量结合乔木枝下高这一参数综合分析认为: 枝下高低于 2 m 的林带降噪效果更佳。图 2 表 4 参 37

关键词: 城市生态学; 道路林带; 降噪; 三维绿量(LVV); 枝下高

中图分类号: S718.51 **文献标志码:** A **文章编号:** 2095-0756(2020)02-0251-08

Noise attenuation ability and its affecting factors of green belts of 11 areas in the Yangtze River Delta

LI Yanan¹, HUANG Shaorong², Geriletu³, YAN Lijiao¹

(1. College of Life Sciences, Zhejiang University, Hangzhou 310058, Zhejiang, China; 2. Yuyao Branch, Ningbo Ecological Environment Bureau, Yuyao 315400, Zhejiang, China; 3. Research Institute of Subtropical Forestry, Chinese Academy of Forestry, Hangzhou 311400, Zhejiang, China)

Abstract: [Objective] Under the rapid development of urbanization, the impact of pollution caused by urban traffic noise on the living quality of urban residents has been increasingly recognized. Among many solutions to noise reduction, the green belts on the city roads enjoy the unique advantage in the reduction of traffic noise. The order is to provide references for the selection of measurement index of the noise reduction ability of the urban green belt, and give suggestions on how to achieve the optimal noise reduction effect of the urban green belt construction. [Method] This research studies the road forest belts on the major traffic roads of 11 areas (counties, cities and districts) in the Yangtze River Delta and uses the comprehensive comparative analysis of the ratio of different forest belt types, living vegetation volume and the under branch height to conduct a preliminary evaluation on the noise reduction of green belts. [Result] The noise reduction of green belts on the major traffic roads in Xuanwu District of Nanjing and Runzhou District of Zhenjiang are most effective among the 11 areas (counties, cities and districts), while those in Lianyun District of Lianyungang and Qingyuan Town of Lishui are least effective. Rationally mixed forest of arbor and shrub is better for the noise reduction.

收稿日期: 2019-04-15; 修回日期: 2019-06-12

基金项目: “十三五”国家重点研发计划项目(2016YFC0502704)

作者简介: 李亚楠, 从事城市生态学研究。E-mail: yannan@163.com。通信作者: 严力蛟, 教授, 从事生态城市、生态环境规划研究。E-mail: yanlj@zju.edu.cn

The results of the simulation model indicate a positive relationship between additional noise reduction of 11 areas (counties, cities and districts) and the living vegetation volume obtained from statistics. [Conclusion] From the comprehensive analysis of the combination of the living vegetation volume and the under branch height, it could be concluded that the effect of noise reduction within the range of 2 m of the under branch height is better. [Ch, 2 fig. 4 tab. 37 ref.]

Key words: ecology; green belt; noise attenuation; living vegetation volume(LVV); under branch height

城市环境噪声污染,尤其是交通噪声污染,对于城市居民的正常生活有着重要影响,城市化的飞速发展导致交通噪声成为城市噪声最主要的来源^[1]。国内外学者对于降低交通噪声进行了多方面的探索和研究^[2]。在诸多降噪方法中,植物除了能够达到有效降噪目的外,还兼有滞尘、降温与持水等作用,同时可以提升城市美感与居民幸福感^[3-5],具有一定心理降噪作用^[6]。目前,对于城市林带降噪的研究都集中在某个或某几个公园或者某段公路林带在不同噪声频率、植被类型以及林带宽度对林带降噪影响方面的研究^[7-10],尚无在较广区域范围结合林带三维绿量等参数进行道路林带降噪方面影响的研究。本研究选取长江三角洲地区11个县(市、区)作为研究对象,评估样地交通干道绿化带主要植被组成以及降噪能力,分析林带三维绿量与枝下高等参数对于绿化带降噪能力的影响,进而提出对于城市道路林带的选择建议。

1 研究区概况

选取长江三角洲地区4条纬度带(34.5°N、32.0°N、30.0°N、27.5°N)上包括绍兴诸暨市、杭州淳安县、杭州富阳区、宁波余姚市、连云港连云区、徐州丰县、上海崇明岛、南京玄武区、镇江润州区、温州苍南县、丽水庆元县等11个县(市、区)。长江三角洲地区属于亚热带季风气候区,四季分明,土地及森林资源丰富,经济发展迅速,人员流动量大,随之而来的空气、噪声等城市污染问题日趋严重。

2 数据来源与研究方法

2.1 数据调查与收集

2015年6-10月,在研究区域建成区的交通干道上采用机械取样的方法,根据实地情形在每个县(市、区)选取10~20个样地,共149个10 m × 10 m样地。样地宽度的选取参考孙伟等^[11]、王慧等^[12]关于林带宽度在降噪功能方面的研究,林带的划分参考许飞等^[13]、郟光发^[14]在城市林带方面的研究以及《城市绿地分类标准》(2012年由国家建设部颁布)对于城市森林的分类方法,样地林带类型的划分参照陈际伸^[15]、韦如萍等^[16]对于混交林营造机理的研究、样地现场平均植株高度以及LY/T 1812-2009《中华人民共和国林业行业标准》(2009年由国家林业局颁布)。

2.2 研究方法

2.2.1 三维绿量的引入与计算 目前,国内外对于城市或城郊道路林带降噪效果的研究主要集中在植被对不同频率噪声的吸收效果,以及植物配置模式、林带宽度、叶片形状与质量等物理参数对林带降噪效果的影响等方面^[17-19]。噪声的衰减效果会因植物表面显微结构及纹理不同而有差异,故而同种类型的植被在不同生活阶段对噪声的衰减作用也不尽相同。三维绿量(living vegetation volume, LVV),也称立体绿量,是结合乔木冠幅、胸径等参数计算得到的综合指标,能够描述植被空间结构和定量研究城市森林与环境之间相关关系,对于林带结构差异描述更为确切。引入三维绿量衡量林带降噪效果的影响,可以在一定程度上消除用同种类型的林带降噪率计算公式带来的误差。乔木的单株三维绿量为树冠绿量与冠下绿量之和,样地三维绿量由单株三维绿量累积获得,一般根据树冠形状来确定三维绿量计算公式^[20-22]。本研究植被树冠类型由调查获取,同时综合参考中国植物志(<http://frps.iplant.cn>)、*The Plant List* (<http://www.theplantlist.org>)。研究区植被树冠类型与其对应的三维绿量计算公式如表1所示。卵形树冠的三维绿量 s 为树冠绿量 s_1 与冠下绿量 s_2 的和,其他树冠类型不计冠下绿量。灌木、草本的三维绿量计算公式参照王东良等^[23],以盖度与株高的乘积作为结果。

2.2.2 道路林带附加降噪值的计算 要得到更为可靠的研究结果,降噪模型需选取能够综合考虑林带各

表 1 研究区域植被树冠类型及三维绿量计算公式

Table 1 Crown shape of plants and their calculation formula of LVV

树冠形状	树冠绿量计算公式	冠下绿量计算公式	树种
卵形	$s_1 = \pi x^2 y / 6$	$s_2 = \pi d^2 h / 4$	女贞 <i>Ligustrum lucidum</i> 、珊瑚树 <i>Viburnum odoratissimum</i> 、樟树 <i>Cinnamomum camphora</i> 、无刺枸骨 <i>Ilex cornuta</i> 、悬铃木 <i>Platanus orientalis</i> 、桂花 <i>Osmanthus fragrans</i>
圆锥形	$s = \pi x^2 y / 12$	不计冠下绿量	杜英 <i>Elaeocarpus decipiens</i> 、银杏 <i>Ginkgo biloba</i> 、龙爪槐 <i>Sophora japonica</i> 、广玉兰 <i>Magnolia grandiflora</i> 、水杉 <i>Metasequoia glyptostroboides</i> 、黄山栎树 <i>Koeleria bipinnata</i> 、合欢 <i>Albizia julibrissin</i> 、鹅掌楸 <i>Liriodendron chinense</i> 、茶花 <i>Camellia japonica</i> 、鸡爪槭 <i>Acer palmatum</i>
圆柱形	$s = \pi x^2 y / 4$	不计冠下绿量	垂丝海棠 <i>M. halliana</i> 、龙柏 <i>Sabina chinensis</i> 、枫杨 <i>Pterocarya stenoptera</i> 、石榴 <i>Punica granatum</i> 、梔子 <i>Gardenia jasminoides</i> 、海棠 <i>Malus spectabilis</i> 、连翘 <i>Forsythia suspensa</i> 、夹竹桃 <i>Nerium indicum</i> 、构树 <i>Broussonetia papyrifera</i> 、木槿 <i>Hibiscus syriacus</i>
球形	$s = \pi x^2 y / 6$	不计冠下绿量	海桐 <i>Pittosporum tobira</i> 、金边黄杨 <i>Euonymus japonicus</i>

说明：x 为平均冠幅(m)，y 为平均冠高(m)，d 为平均直径(m)，h 为平均枝下高(m)

种林分参数的多变量非线性模型，并且该模型的研究区域最好能够与本研究区域具备相近的地理位置与相似的自然环境条件^[24-27]。本研究采用沈建章等^[28]在浙江长宜高速路段不同树种构成的水平空间上对于交通噪声衰减作用的实验得出的绿化带噪声衰减拟合模型，计算得到研究城市样地绿化带噪声衰减值。绿化带宽度 l 与其附加降噪量 Q 之间的关系为 $Q = ab^{-cl} + c$ ，其中：参数 a 、 b 、 c 的值如表 2 所示， e 为常数。对于乔木林附加降噪量结合乔木种类、叶形、枝干等特征参照水杉 *Metasequoia glyptostroboides* 林和桃 *Amygdalus persica* 林的计算方法进行。

2.2.3 相关性分析 用 Excel 和 SPSS 25.0 统计分析软件，使用 Pearson 相关性分析法对于研究区样地三维绿量(LVV)与附加降噪值之间的相关关系进行分析。

2.2.4 秩和检验 用 SPSS 25.0 统计分析软件做 Kruskal-Wallis 秩和检验，对于绿化带不同枝下高范围与附加降噪量间进行多样本比较。

表 2 绿化带噪声衰减拟合模型参数^[28]

Table 2 Simulation model parameters of noise reduction of green belts

林带类型	参数		
	a	$1/b$	c
空地	-9.54 ± 0.13	10.3 ± 0.37	9.53 ± 0.13
乔灌混交林	-32.5 ± 1.12	12.0 ± 1.03	32.7 ± 1.13
乔木混交林	-17.3 ± 1.19	16.1 ± 2.48	17.3 ± 1.28
灌木混交林	-32.0 ± 1.07	19.2 ± 1.31	31.9 ± 1.15
水杉林	-15.8 ± 0.37	14.2 ± 0.79	15.7 ± 0.39
桃林	-24.8 ± 1.64	15.5 ± 2.32	25.1 ± 1.74

3 结果与分析

3.1 研究区道路林带类型及占比分析

由表 3 所示：在长江三角洲地区 11 个县(市、区)的道路林带调查样地中，除绍兴诸暨市无乔木混交林外，其他全部都有乔灌混交林、乔木混交林以及乔木林这 3 种林带类型，仅绍兴诸暨市有灌木混交林，徐州丰县有灌木林。根据不同绿化带配置对于降噪效果影响的研究^[29-30]，乔木和灌木的合理搭配形成的多层次结构有利于形成良好的降噪面，故而乔灌混交林占比达到 80% 的南京玄武区、镇江润州区具备较好的降噪条件。而乔灌混交林占比低于 30% 的连云港连云区、丽水庆元县、杭州富阳区、杭州淳安县等地相对而言降噪条件较差。

3.2 绿化带宽度与其附加降噪量间关系

几种不同类型降噪林带在 10 m 宽度范围内其宽度与附加降噪量之间的相关关系如图 1 所示。在相同宽度下，乔灌混交林的附加降噪值要明显高于其他类型林带。在宽度小于 10 m 范围内各类型林带降噪效果由高到低依次为乔灌混交林、灌木混交林、以桃为代表的落叶乔木林、以水杉为代表的落叶乔木林和乔木混交林，整体在 10 m 处呈现最佳降噪效果，附加降噪量随着宽度值增大而增大，呈现逐渐变缓趋势。

表3 研究区林分参数、组成类型及占比

Table 3 Structural parameter, types and proportion of the green belt

城市	乔灌混交林	混合乔木林	乔木林	混合灌木林	灌木林	乔木枝下高/m	冠幅/m	乔木胸径/m
绍兴诸暨市	杜英-女贞, 樟树-石楠-珊瑚树(50.0)	无(0)	樟树, 悬铃木(45.0)	女贞-珊瑚树(5.0)	无(0)	0.8~2.6	0.5~8.0	0.08~0.33
杭州淳安县	樟树-龙柏, 红花檵木-金叶女贞-月季(27.3)	樟树-桂花; 杜英-樟树(40.9)	樟树, 悬铃木, 桂花(31.8)	无(0)	无(0)	0.8~3.0	1.0~10.0	0.08~0.35
杭州富阳区	樟树-红花檵木-栀子, 杜英-樟树-红花檵木(23.5)	鹅掌楸-樟树; 樟树-茶花; 杜英-樟树(58.8)	枫香, 鹅掌楸(17.6)	无(0)	无(0)	0.1~5.0	0.7~8.0	0.05~0.39
宁波余姚市	樟树-小叶女贞-红花檵木, 杜英-枫杨-红花檵木(40.0)	樟树-杜英; 樟树-广玉兰(25.0)	合欢, 悬铃木; 樟树(35.0)	无(0)	无(0)	0.5~6.0	0.6~6.0	0.02~0.44
连云港连云区	悬铃木-小叶女贞-紫薇(20.0)	樟树-银杏, 桂花-樱花, 朴树-合欢(60.0)	樟树, 悬铃木(20.0)	无(0)	无(0)	0.3~3.5	0.8~6.0	0.02~0.38
徐州丰县	悬铃木-女贞-紫薇, 银杏-女贞-石楠(40.0)	悬铃木-杨树(10.0)	白蜡, 悬铃木(40.0)	无(0)	女贞(10.0)	1.1~4.0	0.5~6.5	0.05~0.31
上海崇明岛	樟树-悬铃木-瓜子黄杨(50.0)	悬铃木-樟树; 樟树-圆柏(30.0)	樟树(20.0)	无(0)	无(0)	0.8~3.5	1.0~7.0	0.06~0.38
南京玄武区	悬铃木-女贞-红花檵木, 水杉-雪松-珊瑚树(80.0)	悬铃木-石楠(10.0)	悬铃木(10.0)	无(0)	无(0)	0.5~7.0	1.0~7.0	0.06~0.40
镇江润州区	悬铃木-石楠-女贞, 樟树-桂花-瓜子黄杨(80.0)	悬铃木-雪松(10.0)	悬铃木(10.0)	无(0)	无(0)	0.6~4.0	0.5~6.0	0.05~0.56
温州苍南县	白兰-榕树-紫薇, 山栎树-红叶石楠-紫薇(30.0)	广玉兰-榕树(10.0)	悬铃木, 樟树; 白兰(60.0)	无(0)	无(0)	0.5~3.5	1.2~8.0	0.06~0.29
丽水庆元县	樟树-瓜子黄杨-檵木(20.0)	广玉兰-杜英(10.0)	杜英, 悬铃木; 樟树(70.0)	无(0)	无(0)	2.0~4.0	1.3~8.0	0.13~0.34

说明: 括号中数据为各林分类型占比(%). 石楠 *Photinia serrulata*、红花檵木 *Loropetalum chinense* var. *rubrum*、月季 *Rosa chinensis*、紫薇 *Lagerstroemia indica*、瓜子黄杨 *Buxus sinica*、雪松 *Cedrus deodara*、白兰 *Michelia alba*、榕树 *Ficus microcarpa*、红叶石楠 *Photinia × fraseri*、檵木 *Loropetalum chinense*、鹅掌楸 *Liriodendron chinense*、樱花 *Cerasus serrulata*、朴树 *Celtis sinensis*、杨树 *Populus*、圆柏 *Sabina chinensis*、枫香 *Liquidambar formosana*、白蜡 *Fraxinus chinensis*、金叶女贞 *Ligustrum × vicaryi*、小叶女贞 *Ligustrum quihoui*

3.3 三维绿量与附加降噪量间的相关分析

用皮尔森相关性分析法对样地三维绿量与附加降噪值之间的相关关系进行双变量相关性分析, 采用双侧检验, 结果如表4所示。对于11个县(市、区)主要道路林带共计149个样地的三维绿量与其附加降噪量之间的相关关系分析可得, 研究地林带三维绿量与附加降噪量之间呈正相关关系, 且在0.05水平(双侧)上相关显著。

根据机械取样和典型取样相结合的方法选取10个样地进行总三维绿量与平均附加降噪量的统计, 结果如图2所示。丽水庆元县的总三维绿量值高达17 336.59 m³, 其附加降噪量却只有12.56 dB, 相对偏低, 这可能与其道路林带类型中乔灌混交林占比低有关; 南京玄武区和镇江润州区2个地区道路林带的附加降噪

表4 三维绿量与附加降噪量间的相关性分析

Table 4 Correlation analysis between the additional noise reduction and living vegetation volume

项目	三维绿量		
	皮尔逊相关性	显著性(双尾)	个案数
附加降噪值	0.195*	0.017	149

说明: *表示在0.05水平相关显著(双尾)

量最高, 达 16.87 dB, 其中镇江润州区的三维绿量值只有 9 968.05 m^3 , 这 2 个地区的乔灌混交林占比也在 11 个县(市、区)里最高。由此可见, 林带降噪能力要结合三维绿量与绿化带类型进行综合判断。

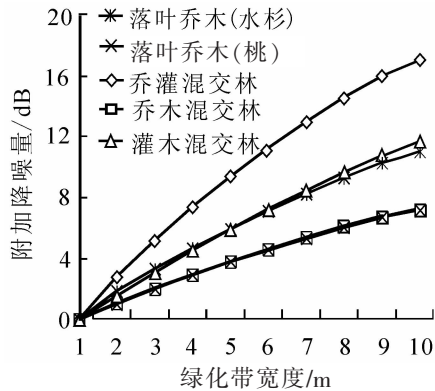


图 1 林带宽度与附加降噪量间关系

Figure 1 Correlativity between the additional noise reduction and width of green belts

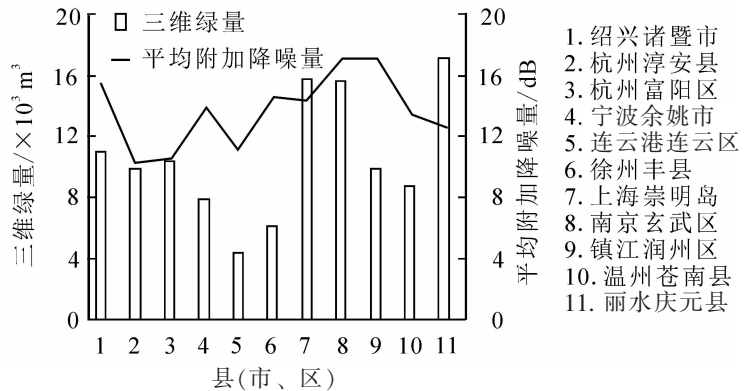


图 2 研究区各县市区总三维绿量与平均附加降噪量间的对应关系

Figure 2 Living vegetation volume and average of the additional noise reduction

3.4 附加降噪量与枝下高间的秩和检验

将 149 个样地中的 74 个乔木林以及乔木混交林样地根据枝下高整体数据分布分为 0~2、2~3 和 >3 m 3 个数据梯度范围组。将 3 组枝下高范围与其所产生的附加降噪量间做 Kruskal-Wallis 检验后得到渐近显著性 ($P=0.00 < 0.01$), 从而得出 3 组不同枝下高范围林带的附加降噪量不同的结论。进一步进行两两比较, 结果表明: 道路林带中乔木林以及乔木混交林可提供的附加降噪量在枝下高范围为 0~2 和 2~3 m 之间 ($P=0.00 < 0.01$) 以及 0~2 和 >3 m 之间 ($P=0.00 < 0.01$) 差异显著; 在 2~3 和 >3 m 范围内没有显著差异 ($P=0.109 > 0.01$)。而枝下高在 0~2 m 范围内的林带三维绿量均值要小于 2~3 m 和 >3 m 的林带, 原因是植株矮小, 相应的冠幅、直径都小。有研究^[31-32]显示: 在距离噪声源水平距离相同、测点高度在 1.2 m 左右的水平下, 高度与分枝越低, 绿化带的降噪效果越好。结合本研究可得: 道路林带的附加降噪量在枝下高 >2 m 后不会有显著差异, 在 <2 m 的情况下, 枝下高越小降噪效果越好。

4 结论与讨论

植物对声波具有衰减作用, 衰减主要通过植物表层纤维、气孔等结构吸收, 转化声波为植物的阻尼振动和反射^[12,33-34]。本研究引入三维绿量作为衡量林带降噪能力的指标, 对长江三角洲地区 11 个县(市、区)的 149 个交通干道绿化带样地的三维绿量进行统计。在本研究区的 149 个样地三维绿量与其附加降噪量间呈正相关关系, 这与曾旻等^[31]对北京地区绿化带降噪效果探究得出的在 0.5 和 1.5 m 处绿化带的单位面积三维绿量与附加降噪量间呈正相关的结论相似。

综合分析林带配置类型、三维绿量及枝下高参数, 发现总三维绿量值高的区域, 其平均附加降噪量不一定高。结合前人在林带降噪方面的研究以及前面对于不同地点林带类型及占比的分析, 三维绿量在衡量林带降噪能力方面尚存在一定缺陷。究其原因, 在三维绿量的计算过程中主要涉及到植株的冠幅、冠高与枝下高, 而越高大的植株, 其这三方面的值越大。但枝下高作为影响植物降噪效果的一个重要因素, 其值越小越有利于林带降噪^[32,35], 需进一步对研究地林带平均枝下高与其降噪量间进行分析, 不能仅用单一指标, 这与张志永等^[36]和张庆费等^[37]研究结论一致。对枝下高与附加降噪量做 K-S 检验, 得到 2 m 是枝下高这一参数能够影响附加降噪量的一个临界值, 这与孙伟等^[11]的研究结果相近。

根据长江三角洲地区 11 个县(市、区)交通干道绿化带的配置类型以及占比分析得到, 南京玄武区、镇江润州区的交通干道的绿化带中乔灌林占比较高, 具备良好降噪环境。连云港连云区、丽水庆元县、杭州富阳县、杭州淳安县等地的道路绿带乔灌林占比较低, 不利于降噪, 故而应提高这些地区道路林带的乔灌林占比。城市道路林带对于噪声的衰减作用与林带配置类型、三维绿量以及枝下高密切相关, 林带具备良好降噪效果需同时满足具备合理的乔灌配置、较高三维绿量值、乔木林与乔木混交林的枝下高小于 2 m 等条件。

本研究仅利用样地林带的冠幅、胸径、枝下高等基本参数进行较为基础的研究分析, 由于林带在组成以及结构方面都较复杂, 还需增加合理的监测研究。

5 参考文献

- [1] 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, 2017.
PU QI. *Study on the Impact Expressway and Main Road Traffic Noise on Its Surrounding Buildings in Shenzhen* [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2017.
- [2] 扈军, 葛坚. 城市绿化带对交通噪声衰减效果与模拟分析[J]. 城市环境与城市生态, 2013, 26(5): 33 – 36.
HU JUN, GE JIAN. Attenuation effect and simulation analysis of urban green belt on traffic noise [J]. *Urban Environ Urban Ecol*, 2013, 26(5): 33 – 36.
- [3] 张晶, 郭小平, 王宝, 等. 绿化带降噪机理及模型研究进展[J]. 热带亚热带植物学报, 2013, 21(4): 381 – 388.
ZHANG Jing, GUO Xiaoping, WANG Bao, *et al.* Research progress on noise reduction mechanism and model of green belt [J]. *J Trop Subtrop Bot*, 2013, 21(4): 381 – 388.
- [4] VEISTEN K, SMYRONVA Y, KLÆBOLE 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]. *Int J Environ Res Public Health*, 2012, 9: 3770 – 3788.
- [5] ISLAM M N, RAHMAN K S, BAHAR M M. Pollution attenuation by roadside greenbelt in and around urban areas [J]. *Urban For Urban Green*, 2012, 11: 460 – 464.
- [6] YANG Fan, BAO Zhiyi, ZHU Zhujun. An assessment of psychological noise reduction by landscape plants [J]. *Int J Environ Res Public Health*, 2011, 8(4): 1032 – 1048.
- [7] HOSSEINI S A O, ZANDI S, FALLAH A, *et al.* Effects of geometric design of forest road and roadside vegetation on traffic noise reduction [J]. *J For Res*, 2016, 27(2): 463 – 468.
- [8] 李冠衡, 熊健, 徐梦林, 等. 北京公园绿地边缘植物景观降噪能力与视觉效果的综合研究[J]. 北京林业大学学报, 2017, 39(3): 93 – 104.
LI Guanheng, XIONG Jian, XU Menglin, *et al.* Comprehensive study on the noise reduction ability and the visual effect on the edge of green space of Beijing urban park [J]. *J Beijing For Univ*, 2017, 39(3): 93 – 104.
- [9] RENTERGHEM T V, BOTTELDOOREN D, VERHEVEN K. Road traffic noise shielding by vegetation belts of limited depth [J]. *J Sound Vib*, 2012, 331(10): 2404 – 2425.
- [10] ARNOD T. Numerical experiment to revisit micrometeorology and sound speed calculation in forests [J]. *Meteorol Atmos Phys*, 2010, 107(3): 103 – 108.
- [11] 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.
SUN Wei, WANG Weilu, GUO Xiaoping, *et al.* Comparison on attenuation effect of green belts with different types on traffic noise [J]. *J Plant Resour Environ*, 2014, 23(2): 87 – 93.
- [12] 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.
WANG Hui, GUO Jinping, ZHANG Yunxiang, *et al.* Research on noise reduction effect of highway green belt and its influencing factors [J]. *Ecol Environ Sci*, 2010, 19(6): 1403 – 1408.
- [13] 许飞, 邱尔发, 王成, 等. 福建省不同类型乡村水岸林的结构特征[J]. 林业科学, 2011, 47(9): 173 – 180.
XU Fei, QIU Erfa, WANG Cheng, *et al.* Structural characteristics of different types of rural water bank forests in Fujian Province [J]. *For Sci*, 2011, 47(9): 173 – 180.
- [14] 郅光发. 北京建成区城市森林结构与空间发展潜力研究[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2006: 14 – 15.
QIE Guangfa. *Study on Urban Forest Structure and Spatial Development Potential in Beijing Built-up Area* [D]. Beijing: Chinese Academy of Forestry, 2006: 14 – 15.
- [15] 陈际伸. 混交林营造及其机理的研究概况[J]. 江西林业科技, 2001(2): 26 – 28, 34.
CHEN Jishen. Study on mixed forest construction and its mechanism [J]. *Jiangxi For Technol*, 2001(2): 26 – 28, 34.
- [16] 韦如萍, 薛立. 混交林研究进展[J]. 湖南林业科技, 2002(3): 78 – 81.

- WEI Ruping, XUE Li. Research progress of mixed forest [J]. *Hunan For Technol*, 2002(3): 78 – 81.
- [17] OW L F, GHOSH S. Urban cities and road traffic noise: reduction through vegetation [J]. *Appl Acoust*, 2017, **120**: 15 – 20.
- [18] 杜振宇, 邢尚军, 宋玉民, 等. 高速公路绿化带对交通噪声的衰减效果研究[J]. *生态环境*, 2007, **16**(1): 31 – 35.
- DU Zhenyu, XING Shangjun, SONG Yuming, *et al.* Study on the attenuation effect of highway green belt on traffic noise [J]. *Ecol Ecosyst*, 2007, **16**(1): 31 – 35.
- [19] LI Mengmeng, KANG Jian. Plant species selection based on leaf vibration experiments [J]. *Mater Sci Eng*, 2018, **371**. doi:10.1088/1757-899X/371/1/012038.
- [20] 周坚华, 孙天纵. 三维绿色生物量的遥感模式研究与绿化环境效益估算[J]. *环境遥感*, 1995, **10**(3): 162 – 174.
- ZHOU Jianhua, SUN Tianzong. Remote sensing model research of living vegetation volume and estimation of greening environmental benefits [J]. *Environ Remote Sensing*, 1995, **10**(3): 162 – 174.
- [21] 刘常富, 何兴元, 陈玮, 等. 沈阳城市森林三维绿量测算[J]. *北京林业大学学报*, 2006, **28**(3): 32 – 37.
- LIU Changfu, HE Xingyuan, CHEN Wei, *et al.* The living vegetation volume estimation of Shenyang urban forest [J]. *J Beijing For Univ*, 2006, **28**(3): 32 – 37.
- [22] 孙晓梅, 勾萍, 黄彦青, 等. 大连市建成区城市森林三维绿化结构研究[J]. *环境科学与技术*, 2014, **37**(6): 440 – 443, 452.
- SUN Xiaomei, GOU Ping, HUANG Yanqing, *et al.* Research on living vegetation structure of urban forest in Dalian built-up area [J]. *Environ Sci Technol*, 2014, **37**(6): 440 – 443, 452.
- [23] 王东良, 金荷仙, 范丽琨, 等. 疗养院人工绿地三维绿量分布特征及影响因子[J]. *浙江农林大学学报*, 2013, **30**(4): 529 – 535.
- WANG Dongliang, JIN Hexian, FAN Likun, *et al.* Distribution characteristics and influence factors of living vegetation volume in artificial green space of nursing home [J]. *J Zhejiang A&F Univ*, 2013, **30**(4): 529 – 535.
- [24] BARBIER E B, KOCH E W, SILLIMAN B R, *et al.* Coastal ecosystem based management with nonlinear ecological functions and values [J]. *Science*, 2008, **319**(5861): 321 – 323.
- [25] DAKHIA K, BEREZOWSKA-AZZAG E. Urban institutional and ecological footprint: a new urban metabolism assessment tool for planning sustainable urban ecosystems [J]. *Manage Environ Qual Int J*, 2010, **21**(1): 78 – 82.
- [26] BOLIN K. Prediction method for wind-induced vegetation noise [J]. *Acta Acust Unit Acust*, 2009, **95**(4): 607 – 619.
- [27] DEEPAK S, AMIT P, SRIVASTAVA A K, *et al.* The effects of meteorological parameters in ambient noise modeling studies in Delhi [J]. *Environ Monit Assess*, 2013, **185**: 1873 – 1882.
- [28] 沈建章, 洪文俊, 徐彦杰, 等. 高速公路绿化林带降噪效果研究[J]. *绿色科技*, 2017(22): 27 – 30.
- SHEN Jianzhang, HONG Wenjun, XU Yanjie, *et al.* Research on noise reduction effect of highway greenbelt [J]. *J Green Sci Technol*, 2017(22): 27 – 30.
- [29] 陈龙, 谢高地, 盖力强, 等. 道路绿地消减噪声服务功能研究: 以北京市为例[J]. *自然资源学报*, 2011, **26**(9): 1526 – 1534.
- CHEN Long, XIE Gaodi, GAI Liqiang, *et al.* Research on noise reduction service function of road green space: taking Beijing as an example [J]. *J Nat Resour*, 2011, **26**(9): 1526 – 1534.
- [30] 赵明, 孙桂平, 何小弟, 等. 城市绿地群落环境效应研究: 以扬州古运河风光带生态林为例[J]. *上海交通大学学报(农业科学版)*, 2009, **27**(2): 167 – 170, 176.
- ZHAO Ming, SUN Guiping, HE Xiaodi, *et al.* Studying on environmental effect of urban forest along the grand canal in Yangzhou [J]. *J Shanghai Jiaotong Univ Agric Sci*, 2009, **27**(2): 167 – 170, 176.
- [31] 曾响, 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.
- ZENG Yang, GUO Xiaoping, LI Yuke, *et al.* Spatial variation rule of noise reduction effect of three configuration modes of greenbelts in Beijing City [J]. *J Plant Resour Environ*, 2017, **26**(2): 68 – 75.
- [32] 郭中富, 倪涌舟. 降噪绿化林带构建模式探讨[J]. *环境保护前沿*, 2013, **3**(4): 107 – 110.
- GUO Zhongfu, NI Yongzhou. Study on a spatial construction model of forest belts for noise reduction [J]. *Adv Envi-*

- ron Prot*, 2013, **3**(4): 107 – 110.
- [33] van RENTERGHEM T, ATTENBOROUGH K, MAENNEL M, *et al.* Measured light vehicle noise reduction by hedges [J]. *Appl Acoustics*, 2013, **78**: 19 – 27.
- [34] PATHAK V, TRIPATHI B D, MISHRA V K. Dynamics of traffic noise in a tropical city Varanasi and its abatement through vegetation [J]. *Environ Monit Assess*, 2008, **146**: 67 – 75.
- [35] 郭小平, 彭海燕, 王亮. 绿化林带对交通噪声的衰减效果[J]. 环境科学学报, 2009, **29**(12): 2567 – 2571.
GUO Xiaoping, PENG Haiyan, WANG Liang. The effects of traffic noise attenuation by green belts [J]. *J Environ Sci*, 2009, **29**(12): 2567 – 2571.
- [36] 张志永, 李全明, 南海龙, 等. 北京平原地区公路典型绿化带降噪功能初探[J]. 林业科学研究, 2017, **30**(2): 329 – 334.
ZHANG Zhiyong, LI Quanming, NAN Hailong, *et al.* Study on noise attenuation of green belts in plain area [J]. *For Res*, 2017, **30**(2): 329 – 334.
- [37] 张庆费, 郑思俊, 夏楠, 等. 上海城市绿地植物群落降噪功能及其影响因子[J]. 应用生态学报, 2007, **18**(10): 2295 – 2300.
ZHANG Qingfei, ZHENG Sijun, XIA Lei, *et al.* Noise-reduction function and its affecting factors of urban plant communities in Shanghai [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2007, **18**(10): 2295 – 2300.