

绿化带降噪机理及模型研究进展

张晶, 郭小平*, 王宝, 郭晶晶

(北京林业大学水土保持学院, 水土保持与荒漠化防治教育部重点实验室, 北京 100083)

摘要: 介绍了目前绿化带降噪机理及不同配置模式的绿化带降噪效果的研究进展。从单变量和多变量两方面总结了已有的绿化带降噪模型, 普适性较差, 精确性较低是目前已有模型存在的主要问题。同时, 对绿化带降噪模型的研究前景进行了展望, 认为可以使用非线性生态模型找出影响绿化带降噪量的主要参数, 并分析主要参数与降噪量的关系, 最终拟合出不同绿化带降噪量的非线性预测模型, 从而指导道路绿化带的设计与建设。

关键词: 绿化带; 交通噪声; 降噪机理; 降噪模型

doi: 10.3969/j.issn.1005-395.2013.04.013

Research Advances in Noise Reduction Mechanism and Model of Green Belts

ZHANG Jing, GUO Xiao-ping*, WANG Bao, GUO Jing-jing

(Key Laboratory for Soil and Water Conservation Desertification Combating of Ministry of Education, College of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

Abstract: The research progress on the noise reduction mechanism by green belts, as well as the noise reduction effects of green belts with different configuration modes was introduced. The current univariate and multivariate models were summarized, which were confined to poor universality and low accuracy. Moreover, the possible development in the future was predicated. The main influential parameters could be confirmed by using non-linear ecological models. According to the relationships between parameters and the amount of noise reduction, the non-linear prediction models of noise reduction by different green belts could be fitted, which could guide the design and construction of green belts.

Key words: Green belt; Traffic noise; Noise reduction mechanism; Noise reduction model

随着我国城市经济的发展, 城市道路也不断发展, 形成了立体纵横、网络棋布的城市交通体系。但在城市道路为国民经济和社会发展做出巨大贡献的同时, 也给沿线的生态环境带来了许多不利影响^[1]。据统计, 交通噪声占城市噪声污染的 70%^[2]。目前对交通噪声的防治主要是从声源防治、切断传播途径和受声点防护 3 个方面进行^[3-4]。在切断传播途径方面, 目前应用最广泛的是声屏障和防噪绿

化带, 其中, 声屏障造价高, 且其单调的外形与周围景观不太协调, 容易产生视觉污染, 而绿化带在降低交通噪声的同时, 还可以美化环境, 为驾驶者提供优美的行车空间, 同时还具有吸尘降尘、降温增湿等的作用, 因此在一般性降噪目标的情况下, 使用植物降噪是目前公认的有效且实用的方法^[5-13]。绿化带的降噪作用主要是利用了植物对声波有反射和吸收等作用, 郁闭的植物群落可有效地反射和

收稿日期: 2012-11-05 接受日期: 2013-02-08

基金项目: 北京市路政局公路生态绿化研究项目(20070707)资助

作者简介: 张晶(1985~), 女, 硕士研究生, 研究方向为水土保持和工程绿化。E-mail: xchzhangjing@163.com

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: guoxp@bjfu.edu.cn

吸收声波,犹如一道隔声障板^[14]。

国外植物降噪的研究始于1946年, Eyring 在巴拿马热带雨林的研究表明,灌木丛可以衰减声波能量^[15],而我国这方面的研究开展得较晚,均在2000年以后^[16-17]。近年来,对植物降噪进行了越来越多的研究,并建立了绿化带降噪模型,以指导道路两旁绿化带的建设。然而受研究方法和学科背景等条件的限制,目前绿化带降噪模型的普适性较差,且计算误差较大。本文基于已有的研究成果,在分析绿化带降噪机理、绿化带不同配置模式对降噪效果影响的基础上,阐述了绿化带降噪模型的研究进展,讨论目前已有模型的不足之处,并对绿化带降噪模型的研究前景进行了展望。

1 绿化带的降噪机理

早在20世纪70年代,国外就有研究指出声音的衰减分常规衰减和额外衰减两种,常规衰减是指声波的球形脱离和前进中与空气分子摩擦产生的能量损失,是声音随距离的衰减;额外衰减是指声源和接收器之间存在障碍物,声源遇障碍物发生反射、绕射、散射等现象及障碍物对声源吸收而引起的声音衰减^[18-19],声屏障的作用就是使绕射声波有足够的衰减,隔离透射声波,并增大声波的反射量^[20-21]。绿化带之所以能降低噪声,是因为当声波遇到绿化带时,一部分声能在低频范围内变为树叶和树干的固有振动频率,一部分声能被树木表面气孔和粗糙须毛吸收,一部分声能被植物反射,还有一部分在绿化带中发生绕射和散射等现象^[3,9,22]。综合来看,绿化带的降噪效果主要与绿化带结构特征以及噪声频率有关系。

1.1 绿化带降噪效果和其结构特征的关系

噪声在绿化带中的反射、绕射和散射等现象与绿化带结构特征相关,这些特征值主要包括绿化带的宽度、平均高度、密度等^[3,9,23-27]。郑思俊的研究结果表明,不同植物的隔声性能有差异,这与植物自身的形态特征有关,如植株大小、树冠形态、叶面积、叶量等,而影响植物隔声性能的最主要因素为叶面积和叶量,植物反射的主要部位为枝和叶^[28-31]。针对绿化带对噪声产生的绕射现象,张宏昆的研究结果表明,绿化带高度直接影响到绿化带顶部绕射声衰减的大小及绿化带插入损失的大小^[32];Fang 等

报道声级计和噪声源的高度越低,树高相对高度越高,发生的绕射越多,噪声传播途径越长,噪声衰减值越大^[33],因此声波的绕射与绿化带平均高度相关性较大。针对绿化带对噪声的散射现象,有学者指出植物茎、叶对声波的散射与茎、叶的半径有关,不同植物的茎、叶内部结构不同,其散射作用也各异^[23,34];Aylor 等报道植物茎干发生散射作用的条件是: $2\pi a / \lambda \geq 1$,公式中 a 为树干的半径, λ 为声波的波长^[35-36]。针对绿化带对噪声的吸收现象,袁玲等^[23]认为植物的吸声效果主要与茎、叶的显微结构关系密切,植物茎中的导管具有微穿孔板谐振吸声结构特征,导管小孔孔径非常小(小于 10^{-3} mm),声阻与声质量比值大,加宽了吸声频带,同时导管聚集排列使得各层结构的谐振频率有一定的偏离,展宽可吸声频带;叶片细胞间隙则可看成是由许多近似平行的毛细管组成,声波在毛细管中传播时,媒质质点受到黏滞力的作用,引起声传播过程的热损耗,从而使声波衰减^[37-38]。吴淑杰^[39]指出,林冠表面的声阻抗率越接近空气的特性阻抗率,该植物吸声效果越好,为提高绿化带降噪效果,应当选择叶片细小、表面粗糙、单位体积中叶片数量较多的树种。Cook^[40]对植物降噪的研究结果表明,绿化带越宽,对声音产生的吸收和散射越多。

综上所述,植物的隔声性能主要与叶面积和叶量有关;噪声在绿化带中的反射主要与枝、叶有关;绕射受绿化带平均高度的影响较大;散射与绿化带宽度、茎、叶的半径以及声波特性有关;植物的吸声效果主要与绿化带宽度、茎、叶的显微结构和林冠表面的声阻抗率有关。

1.2 绿化带降噪效果和噪声频率的关系

植物叶片对噪声的衰减主要表现在高频率段,叶片数量越多,密度越大,叶表面被毛越浓密,叶片对高频率段噪声的衰减量越大^[41-43];茎对噪声的衰减主要在低频段。Tarrero 的研究表明,植物对噪声衰减的影响与茎的胸径有关,随着胸径的增加,吸收峰向低频方向移动^[29,35,44-45]。近年来,开展了植物的降噪能力与植物内部显微结构和噪声频率关系的研究,结果表明,“大气-茎皮孔-导管(管胞)”的构造特征与低频部分衰减曲线有良好的依赖性;“大气-叶片气孔-细胞间隙”的构造特征与中高频衰减曲线有良好的依赖性,从而认为500 Hz 以下的低频段绿化带噪声衰减量主要与植物茎的构造

及数量有关,绿化带对 500 ~ 2000 Hz 频率段噪声的衰减量主要与叶片结构及数量有关,对 2000 Hz 以上高频段噪声衰减量与树高度及外部形态有关^[48-49]。

2 不同配置模式绿化带的降噪效果

研究者通过对不同配置模式的绿化带进行降噪试验,总结出降噪效果好的配置模式。贾鹏^[48]和张明丽^[49]认为不同树种对噪声的衰减量大小依次为:针叶乔木 > 阔叶乔木 > 灌木 > 草坪。不同配置模式绿化带的降噪效果,由高中低不同层次的灌、乔木组成的复层结构群落的降噪效果优于一般的灌木林或没有下木层的乔木林,且各层次紧密结合的群落的降噪效果较优^[24,27,29,50-52]。张万旗^[53]对厦门市交通主干道绿化带结构及降噪效果进行了研究,认为绿化带在设计上应采用多层复合结构,适当采用密分枝型树种与观赏性好的树种搭配,绿化带宽度宜在 4 m 以上,在功能上既能兼顾降噪效果,又不影响景观效果。陆旭蕾^[54]等测量了街道绿地、公共绿地和特殊绿地(草坪足球场)对噪声的衰减作用,认为街道绿地中的乔、灌、花草搭配型的降噪效果较好。罗海霞^[22]等研究了复合式绿化带的降噪效果,认为种植宽 10 m 的复合式绿化带能够起到较好的降噪效果。Pathak 等将植物抗空气污染指数(APTI)、植物相关生物学以及植物社会学特征等因素总结成林带的降噪预期性能指标(API),不同林带 API 值不同,API 值越高,绿化带降噪及防治空气污染能力越强^[42]。同时 Rosa 等^[55]将植物材料作为声子晶体研究中的散射体,研究结果表明,植物的排列方式对绿化带降噪效果影响较大。因此,不同配置模式绿化带的降噪效果是不一样的,绿化带应当采用在立体空间上多层次分布且结合紧密的复合结构,如乔、灌、花、草相结合的配置模式,才能在相同的绿化空间上取得最大的降噪效果。

近年也开始了气象要素对林带降噪影响的研究^[56-59],Arnold 等^[60-61]指出微气象对声波在绿化带中的传播具有较大影响,并提出使用有限差分计算机模拟方法计算微观物理方面对声波,主要是对声波速度的影响,同时指出不同配置结构绿化带对声波影响是不同的,且林冠下方声波的传输损失与地面阻抗有关。

3 绿化带降噪模型

交通噪声预测模型是环境噪声研究的重要部分,美国 FHWA 噪声预测模型的最新版 TNM 2.5 考虑了建筑、声屏障及植被的衰减与多重反射等因素。Hastings 等^[62-63]将该模型应用于不同道路和地面。英联邦国家和中国香港使用的是 CRTN 88 模型^[64],该模型认为植物降噪效果不佳,特别是窄林带和灌木基本不能降噪。德国目前使用的是 RLS 90 模型^[65],该模型对地面植被导致的噪声衰减考虑欠缺,在预测绿化带降噪时误差较大。北欧环境噪声预测模型 Nord 2000 细化了地面类型,将地面流阻系数按 7 种类型取值,较好地模拟了地面障碍物对声波散射的模型,但模型中假设林带各处均匀,绿化带对噪声的阻抗模型过于简单^[66]。这几个使用范围较广的模型存在的最主要问题是它们均为通用模型,且将建筑和绿化带等障碍物对交通噪声的衰减未作区分来进行研究,更没有对绿化带降噪进行单独深入的研究,同时没有考虑绿化带的高度、密度等对降噪效果的影响,计算结果过于粗略。

一些研究者在绿化带降噪机理等研究的基础上,通过分析绿化带相关特征因子与绿化带降噪量的相关关系,建立了专门的绿化带降噪模型。这些模型能用于预测道路两旁绿化带对交通噪声的衰减量,从而指导道路绿化带的设计与建设。本文从单变量模型和多变量模型 2 个方面来总结已有的绿化带降噪模型。

3.1 单变量模型

单变量模型有以下几个:

(1)《公路建设项目环境影响评价规范》(JTGB03-2006)^[67]中绿化带的降噪量按下式计算:

$$\Delta L(\text{dB}) = -kb \quad (1)$$

式中:k为绿化带的平均衰减系数, $k=0.1 \text{ dB m}^{-1}$; $b(\text{m})$ 为噪声通过绿化带的宽度。

(2)张万旗^[53]对厦门市主干道绿化带的降噪试验,得出绿化带降噪量 $\Delta L(\text{dB})$ 与绿化带宽度 $b(\text{m})$ 呈显著的线性关系:

$$\Delta L = 1.2251b + 0.2416 \quad (2)$$

(3)郭小平^[68]对 10 处绿化带的噪声衰减进行试验,认为绿化带降噪量 $\Delta L(\text{dB})$ 随其宽度 $b(\text{m})$ 增加而增大,得线性回归方程(决定系数为 0.990):

$$\Delta L = 0.363b + 0.354 \quad (3)$$

(4) 杜振宇等^[69]对高速公路两侧 9 种绿化带的降噪量进行回归分析,认为降噪量 $\Delta L(\text{dB})$ 与绿化带宽度 $b(\text{m})$ 成极显著线性关系,拟合方程为:

$$\Delta L = 0.0675 + 0.122b \quad (4)$$

3.2 多变量模型

多变量模型有以下几个:

(1) 袁秀湘^[24]对 8 处绿化带进行降噪量测试,经与式(1)比较,认为式(1)中的平均衰减系数 k 的赋值太过粗略,且 k 值与绿化带能见度 $n(\text{m})$ 有良好的负线性相关性,得到模型:

$$\Delta L = -kb \quad (k = 0.126 - 0.0017n) \quad (5)$$

(2) 杜振宇等^[69]对高速公路两侧 9 种绿化带的降噪量进行回归分析,认为降噪量 $\Delta L(\text{dB})$ 与绿化带宽度 $b(\text{m})$ 和郁闭度 D 的乘积有线性关系:

$$\Delta L = -0.215 + 0.112bD \quad (6)$$

(3) Beranek^[70] 于 1971 年提出了绿化带宽度与降噪量的计算公式:

$$\Delta L_{\text{shrub}} = 10 \lg(r_n / r_0) + (0.18 \log f - 0.31) (r_n - r_0) \quad (7)$$

$$\Delta L_{\text{forest}} = 10 \lg(r_n / r_0) + 0.01 f^{1/3} (r_n - r_0) \quad (8)$$

式中: $\Delta L(\text{dB})$ 为绿化带降噪量; $r_n(\text{m})$ 为测量点到声源的距离; $r_0(\text{m})$ 为声源到最近树带边缘的距离; $f(\text{Hz})$ 为声波频率。两式中第一项表示由于声源与接收者间因距离的增加而产生的声衰减;第二项为树林和灌木(草)丛反射、散射和吸收引起的声衰减。

(4) 袁玲^[23]通过半经验法确定绿化带的吸声、散射及绿化带的面密度等影响因素,结合绿化带降噪试验数据,将绿化带分为阔叶和针叶 2 种类型,得出绿化带平均声波衰减量计算公式:

$$\Delta L = -c[1 + 20 / (p + a)] \lg(bz / s + H / h) \quad (9)$$

式中: $b(\text{m})$ 为绿化带宽度, $p = b^{1/3}$; $a(\text{m})$ 为绿化

带前端距公路中心线距离; z 为树平均冠幅; $s(\text{m}^2)$ 为平均种植间距, $s = ij$, 其中 $i(\text{m})$ 为行间距, $j(\text{m})$ 为株间距; $H(\text{m})$ 为平均树高, 当树高 H 超过 7 m 时, 按 7 m 计算; $h(\text{m})$ 为最低分枝高度; c 为调整系数, 针叶冬季雪地 c 值为 2.5, 阔叶夏秋季 c 值为 2.2, 阔叶冬季、针叶夏秋季以及针叶冬季无雪地 c 值均为 1.5。

(5) 解宝灵^[71]提出绿化带降噪量公式,公式分为两项,第一项为距离衰减,第二项是由经验得出的绿化带引起的附加衰减:

$$\Delta L = 10 \lg(r_2 / r_1) + k(r_2 - r_1) \quad (10)$$

式中: $\Delta L(\text{dB})$ 为绿化带降噪量; $r_1(\text{m})$ 、 $r_2(\text{m})$ 为绿化带前后距声源距离; k 为与绿化带吸声特性有关的系数。

(6) 张宏昆^[32]提出,对于多树带噪声衰减值为:

$$\Delta L = 20k \lg \frac{r_n}{r_1} + 1.52 + \beta \sum_{i=1}^n B_i \quad (11)$$

式中: $\Delta L(\text{dB})$ 为绿化带降噪量; k 为系数,枝叶浓密时 $k = 1.5$, 枝叶稀疏时 $k = 1.2$; $r_n(\text{m})$ 为测量点到声源的距离; $r_1(\text{m})$ 为声源到最近树带边缘的距离; n 为树带数目; $\beta(\text{dB m}^{-1})$ 为树带的单位长度衰减系数(表 1), 计算时可取平均值; $B(\text{m})$ 为树带宽度, $B = B_1 + B_2 + \dots + B_n$ 。式中第一项表示由于声源与接收者间因距离的增加而产生的声衰减;第二项为绿化带正面反射而降低的噪声;第三项表示单位吸声量为 β 时,树冠和灌木丛吸声引起的声衰减。

综上所述,式(1)~(5)均是线性模型(其中式(1)中 n 值前的系数很小,所以该式可以看作线性模型);式(6)~(11)均是非线性模型。式(1)~(6)由于考虑因素太少,忽略了绿化带降噪效果与绿化带的其它结构特征以及噪声频率的关系,因此这几个模型的计算结果误差较大。式(7)、(8)、(10)和(11)均将绿化带降噪量分为几项,其中第一项均是距离衰减,其中式(7)、(8)第二项为绿化带反射、散

表 1 不同种类树带的衰减系数(β , dB m^{-1})^[32]

Table 1 Attenuation coefficients (β , dB m^{-1}) of different tree belts^[32]

树带 Tree belt	频率 Frequency (Hz)					平均值 Average (dB m^{-1})
	200 ~ 400	400 ~ 800	800 ~ 1600	1600 ~ 3200	3200 ~ 6400	
松树 Pine	0.08 ~ 0.11	0.13 ~ 0.15	0.14 ~ 0.15	0.16	0.19 ~ 0.20	0.15
小松树 Small pine	0.10 ~ 0.11	0.10	0.10 ~ 0.15	0.10	0.14 ~ 0.20	0.15
冷杉树 <i>Abies fabri</i>	0.10 ~ 0.12	0.14 ~ 0.17	0.18	0.14 ~ 0.17	0.23 ~ 0.30	0.18
阔叶树 Broad-leaved tree	0.05	0.05 ~ 0.07	0.08 ~ 0.10	0.11 ~ 0.15	0.17 ~ 0.20	0.12 ~ 0.17

射和吸收引起的声衰减,这是早期绿化带降噪研究得出的计算公式,所建模型并没有运用在实际道路绿化带建设中;式(10)第二项为由经验得出的绿化带引起的附加衰减, k 值所包含的绿化带吸声特性值并不明确,因此无法在实际中指导绿化带建设;式(11)第二项为绿化带正面反射而降低的噪声,第三项表示绿化带吸声引起的声衰减,但第二项是常数 1.52,对于不同配置方式组成的不同绿化带的反射量肯定不相同,所以该模型无法推广使用。式(9)较全面地考虑了绿化带中影响降噪效果的因子,但是该模型的数据支持不够充分,其广泛适用性没有得到很好的确定。因此为得到精确度高的绿化带降噪模型还需要做更进一步的研究。

将非线性的思想、方法和生态研究相结合是近年来的一个研究热点^[72-76],并取得了巨大进展,非线性生态模型是应用非线性科学的理论与方法来研究生态系统中各生命类群之间的复杂关系以及生命系统与环境系统之间相互作用的定量化工具。目前,研究人员将应用非线性科学的理论和方法分为 3 类^[77]:以生态结构为研究对象的非线性生态模型,以生态功能为研究对象的非线性生态模型,和以生态结构与功能相互作用为研究对象的非线性生态模型。绿化带降噪由于影响因素多、过程复杂,通过对不同绿化带进行大量降噪试验,并运用非线性生态模型相关知识建立绿化带降噪模型能够使模型具有更高的精确度。

4 小结和展望

(1) 绿化带降噪效果主要与绿化带结构特征以及噪声频率有关系。声波在绿化带中的反射、绕射和散射等现象主要受植物茎、叶、绿化带宽度和高度影响,植物吸声效果与茎和叶的显微结构以及林冠表面声阻抗率等相关。但由于声波的反射、绕射等过程十分复杂,如何将该过程的定性与定量分析相结合,得到更精确的结果,还需要通过大量试验进行研究。另一方面,目前有研究认为植物茎主要衰减的是低频率交通噪声,叶片主要衰减中高频率交通噪声,但也有研究指出对于 2 kHz 以上的高频率段,绿化带降噪量与树高及外部形态有关,因此对于 2 kHz 以上高频率噪声衰减的影响因子,还需要利用不同绿化带对高频率噪声进行大量试验,找出精确的影响因素。

(2) 不同配置模式绿化带的降噪效果差别较大,绿化带应当采用乔、灌、花、草相结合形成的多层次立体空间上多层次分布的复合结构,才能使其降噪效果达到最好。为了更进一步了解不同绿化带降噪量的差异和其中的原因,应当对大量不同配置模式组成的绿化带进行噪声衰减试验,获得更多实际可靠的数据。首先应当选择研究区域常见的绿化带树种作为研究对象,且在树种搭配上,应当做到乔灌等结合,并尽量选择具有观赏性的树种,这样不仅可以提高绿化带降噪量,同时还能美化环境,然后将所选树种进行不同方式的排列,如对齐式(植株的行间距相同)、交错式(植株交错排列)、散点式(植株随意排列,但排列紧密),并通过对不同排列方式的绿化带进行降噪量测试,最终筛选出降噪效果最好的配置模式,以指导今后道路两旁降噪绿化带的建设。

(3) 绿化带对交通噪声衰减的影响是多因素和不同程度的。绿化带平均高度和宽度与绿化带降噪效果密切相关;叶片主要衰减中高频段交通噪声,茎主要衰减低频噪声;在绿化带配置模式方面,以多层次复合、乔灌草结合模式降噪效果优于简单模式。

(4) 交通噪声通过绿化带时会产生衰减,衰减量受到绿化带构造特征和声源特性等影响,衰减过程十分复杂,简单的线性关系无法完全模拟这一复杂的过程,因此需要精准性更高的非线性系统来模拟。

目前所得到的绿化带降噪模型精确性较低,普适性较差,且不同植物对噪声的衰减量有明显区别,因此在今后的研究中,应当对不同配置模式的绿化带分别进行大量降噪试验,然后建立不同绿化带的降噪量预测模型。其中对绿化带的降噪过程主要应当考虑两大部分,一是绿化带的结构特征和配置模式特征,即生态结构,二是声波在绿化带中的传播及衰减过程,即生态功能,因此对绿化带降噪量的建模必须从生态结构与功能相互作用为研究对象来建立非线性生态模型,确定建模方向后,需要利用计算机对大量绿化带降噪试验数据进行筛选、分析和总结,找出影响降噪量的主要参数,并分析主要参数与降噪量的关系,找出其中的规律,并建立模型中 5 个组成部分:强制函数或外部变量、状态变量、数学方程、参数和通用函数^[78],最终

拟合出不同绿化带降噪量的非线性预测模型。

参考文献

- [1] Hu C M, Han J. Solutions for the control of traffic noise in Wenzhou City [J]. North Environ, 2012, 24(2): 128–166.
胡长敏, 韩坚. 温州市区交通噪声污染及控制对策 [J]. 北方环境, 2012, 24(2): 128–166.
- [2] Zhou H S, Huang J C, Ni Y C, et al. City traffic noise reduction measure research [J]. Shanghai Highways, 2004(4): 43–46.
周海生, 黄继成, 倪永春, 等. 城市交通噪声降噪措施的研究 [J]. 上海公路, 2004(4): 43–46.
- [3] Ding Y C, Zhou J X, Li H, et al. Investigation of traffic noise attenuation provided by tree belts [J]. Highway, 2004(12): 204–208.
丁亚超, 周敬宣, 李恒, 等. 绿化带对公路交通噪声衰减的效果研究 [J]. 公路, 2004(12): 204–208.
- [4] Li B G, Tao S. Progress in road traffic noise prediction model study [J]. Res Environ Sci, 2002, 15(2): 56–59.
李本纲, 陶澍. 道路交通噪声预测模型研究进展 [J]. 环境科学研究, 2002, 15(2): 56–59.
- [5] Martens M J M. Noise abatement in plant monocultures and plant communities [J]. Appl Acoust, 1981, 14(3): 167–189.
- [6] Wang X R, Ma Y, Chen L. Utilizing botanic decontaminating ability to improve urban environment [J]. Taiyuan Sci-Techn, 2003(3): 21–23.
王笑然, 马勇, 陈丽. 利用植物的吸收净化能力改善城市生态环境 [J]. 太原科技, 2003(3): 21–23.
- [7] Zhang W C. Analysis of ecological barrier's reduction of the highway's traffic noise [J]. Noise Vibra Cont, 2011(4): 128–131.
张玮晨. 生态屏障对干线公路两侧声环境降噪效果的探析 [J]. 噪声与振动控制, 2011(4): 128–131.
- [8] Skärbäck E. Urban forests as compensation measures for infrastructure development [J]. Urban For Urban Green, 2007(6): 279–285.
- [9] 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(1/2/3): 67–75.
- [10] 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(11): 3770–3788.
- [11] 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(4): 460–464.
- [12] Ozer S, Irmak M A, Yilmaz H. Determination of roadside noise reduction effectiveness of *Pinus sylvestris* L. and *Populus nigra* L. in Erzurum, Turkey [J]. Environ Monit Assess, 2008, 144(1/2/3): 191–197.
- [13] Erdogan E, Yazgan M. Landscaping in reduce traffic noise problem in cities: Ankara case [J]. J Teki Agric Facul, 2009, 4(2): 201–210.
- [14] Xiao R B, Zhou T, Zhou Z X. Measurement and analysis of the traffic noise along *Pterocarya stenoptera* green-belts [J]. J Fujian Coll For, 2003, 23(3): 274–276.
肖荣波, 邹涛, 周志翔. 枫杨绿带公路噪声测试与分析 [J]. 福建林学院学报, 2003, 23(3): 274–276.
- [15] Eyring C F. Jungle acoustics [J]. J Acoust Soc Amer, 1946, 18(2): 257–270.
- [16] Yu S X. The northern city of noise to weaken [J]. Chin Landscape Arch, 2000(2): 16–18.
余树勋. 北方城市噪声如何减弱 [J]. 中国园林, 2000(2): 16–18.
- [17] Liu J N. Investigation of the noise attenuation function provided by landscape plant [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2007: 39–47.
刘佳妮. 园林植物降噪功能研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2007: 39–47.
- [18] Herrington L P. Effect of vegetation on the propagation of noise in the out-of-doors [J]. USDA For Serv Gen Techn Rep RM, 1976(32): 229–233.
- [19] Harris C M. Handbook of Noise Control [M]. 2nd ed. New York: McGraw-Hill, 1979: 52–56.
- [20] Zhang P F, Fang B, Zhu X. FEM simulation on barrier controlling traffic noise [J]. Highway Engin, 2011, 36(5): 128–130.
张鹏飞, 方波, 朱湘. 声屏障控制交通噪声的有限元模拟 [J]. 公路工程, 2011, 36(5): 128–130.
- [21] Yao Y, Tu S R, Xue F. Study on design and application of plant acoustic barrier along highway [J]. J Anhui Agri Sci, 2011, 39(17): 10544–10546.
姚阳, 屠书荣, 薛芳. 高速公路沿线植物声屏障设计与应用研究 [J]. 安徽农业科学, 2011, 39(17): 10544–10546.
- [22] Luo H X, Ding J S. Application of the compound woods on preventing and reducing noise at the boundary of the port [J]. Environ Protect Transport, 2003, 24(4): 46–47.
罗海霞, 丁建生. 复合式绿化林带在港区边界噪声防治中的应用 [J]. 交通环保, 2003, 24(4): 46–47.
- [23] Yuan L, Wang X C, Lu Y Y, et al. Calculated method of noise attenuation of tree belts at expressway [J]. China J Highway Transport, 2009, 22(3): 107–112.
袁玲, 王选仓, 鲁亚义, 等. 高速公路林带声衰减量计算方法 [J]. 中国公路学报, 2009, 22(3): 107–112.
- [24] Yuan X X. Highway of traffic noise attenuation by green belts effect analysis [J]. Highways Autom Appl, 2009(2): 114–116.
袁秀湘. 公路绿化林带对交通噪声的衰减效应分析 [J]. 公路与汽运, 2009(2): 114–116.

- [25] Fang C F, Ling D L. Investigation of the noise reduction provided by tree belts [J]. *Landscape Urban Plan*, 2003, 63(4): 187–195.
- [26] Ming L, Zheng J, Cheng H, et al. The traffic noise attenuation provided by the collocation of the evergreen road landscape plants [J]. *Environ Pollut Contr*, 2012, 34(1): 15–18.
明雷, 郑洁, 程浩, 等. 常青道路景观配置对交通噪声的衰减效果 [J]. *环境污染与防治*, 2012, 34(1): 15–18.
- [27] Wang H, Guo J P, Zhang Y X, et al. Study on noise attenuation impact of roadside tree-belts and related influence factors [J]. *Ecol Environ Sci*, 2012, 19(6): 1403–1408.
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*, 2012, 19(6): 1403–1408.
- [28] Watts G, Chinn L, Godfry N. The effects of vegetation on the perception of traffic noise [J]. *Appl Acoust*, 1999, 56(1): 39–56.
- [29] Zheng S J, Xia L, Zheng Q F, et al. City green community noise reduction effect [J]. *Shanghai Constuc Sci Techn*, 2006(4): 33–34.
郑思俊, 夏楠, 张庆费, 等. 城市绿地群落降噪效应研究 [J]. *上海建设科技*, 2006(4): 33–34.
- [30] Heimann D. Numerical simulations of wind and sound propagation through an idealised stand of trees [J]. *Acta Acust Unit Acust*, 2003, 89(5): 779–788.
- [31] Wunderli J M, Salomons E M. A model to predict the sound reflection from forests [J]. *Acta Acust Unit Acust*, 2009, 95(1): 76–85.
- [32] Zhang H K. Study on the parameter design of highway green belts noise reduction [J]. *Highways Autom Appl*, 2009(4): 156–159.
张宏昆. 高速公路林带降噪参数设计研究 [J]. *公路与汽运*, 2009(4): 156–159.
- [33] Fang C F, Ling D L. Guidance for noise reduction provided by tree belts [J]. *Landscape Urban Plan*, 2005, 71(1): 29–34.
- [34] Ding L, Renterghem T V, Botteldooren D. Measurement methodology for acoustic scattering of a single tree [C]// *Proceedings of 20th International Congress on Acoustics, ICA*. California: University of California, 2010: 23–27.
- [35] Aylor D E. Noise reduction by vegetation and ground [J]. *J Acoust Sco Amer*, 1972, 51(1): 197–205.
- [36] Tyagi V, Kumar K, Jain V K. A study of the spectral characteristics of traffic noise attenuation by vegetation belts in Delhi [J]. *Appl Acoust*, 2006, 67(9): 926–935.
- [37] Ma D Y. *Manual of Noise and Vibration Control Engineering* [M]. Beijing: China Machine Press, 2002: 58–62.
马大猷. *噪声与振动控制工程手册* [M]. 北京: 机械工业出版社, 2002: 58–62.
- [38] Ma D Y. Practical absorption limits of MPP absorbers [J]. *Acta Acust*, 2006, 31(6): 481–484.
马大猷. 微穿孔板的实际极限 [J]. *声学学报*, 2006, 31(6): 481–484.
- [39] Wu S J, Han X L. Discuss of noise reduction mechanism [J]. *For China*, 2003(13): 34–35.
吴淑杰, 韩喜林. 林冠降噪机理的探讨 [J]. *中国林业*, 2003(13): 34–35.
- [40] Cook D I, Haverbeke D F V. Trees, shrubs and landforms for noise control [J]. *J Soil Water Conserv*, 1972, 27(6): 259–261.
- [41] Zhang Q F, Xiao J J. Green of noise reduction: Research and construction [J]. *Construc Sci Techn*, 2004(21): 30–31.
张庆费, 肖姣姣. 降噪绿地: 研究与营造 [J]. *建设科技*, 2004(21): 30–31.
- [42] Pathak V, Tripathi B D, Mishra V K. Evaluation of anticipated performance index of some trees species for green belt development to mitigate traffic generated noise [J]. *Urban For Urban Green*, 2011, 10(1): 61–66.
- [43] Nyuk H W, Alex Y K T, Puay Y T, et al. Acoustics evaluation of vertical greenery systems for building walls [J]. *Buil Environ*, 2010, 45: 411–420.
- [44] Mgaret A P, Keith A, Nicholas W H. Sound attenuation through trees: Measurements and models [J]. *J Acoust Soc Amer*, 1988, 84(5): 40–47.
- [45] Femandez A T, Gonzalez J, Machimbarrena M. Validation of an outdoor sound propagation model in presence of trees [J]. *Forum Acust Sevil*, 2002(10): 1–6.
- [46] Yuan L. Influence of plant tissue structure on the spectrum characteristics of traffic noise attenuation [J]. *Noise Vibra Cont*, 2008, 28(5): 154–167.
袁玲. 植物结构对交通噪声衰减频谱特性的影响 [J]. *噪声与振动控制*, 2008, 28(5): 154–167.
- [47] Yuan L, Wang C X, Wu Y L, et al. A study on traffic noise attenuation effect by tree belts in summer and winter [J]. *Highway*, 2009(7): 355–358.
袁玲, 王仓选, 武彦林, 等. 夏冬季公路林带降噪效果研究 [J]. *公路*, 2009(7): 355–358.
- [48] Jia P, Zheng Z. Analysis of influencing factors on highway traffic noise attenuation provided by tree belts [J]. *Mod Transport Techn*, 2010, 7(3): 92–96.
贾鹏, 郑洲. 高速公路绿化林带降噪效果调查与分析 [J]. *现代交通技术*, 2010, 7(3): 92–96.
- [49] Zhang M L, Hu Y H, Qin J. Analysis on noise reduction effect of Urban plant community [J]. *J Plant Res Environ*, 2006, 15(2): 25–28.
张明丽, 胡永红, 秦俊. 城市植物群落的减噪效果分析 [J]. *植物资源与环境学报*, 2006, 15(2): 25–28.
- [50] Chen Z X, Wang X P, Ye W X. Analysis on noise reduction effect of plant hedge [J]. *Guangdong For Sci Techn*, 2003, 19(2): 41–43.
陈振兴, 王喜平, 叶渭贤. 绿篱的降噪效果分析 [J]. *广东林业科技*, 2003, 19(2): 41–43.

- [51] Onder S, Kocbeker Z. Importance of the green belts to reduce noise pollution and determination of roadside noise reduction effectiveness of bushes in Konya, Turkey [J]. *World Acad Sci, Engin Techn*, 2012(66): 639–642.
- [52] Maleki K, Hosseini S M, Nasiri P. The effect of pure and mixed plantations of *Robinia pseudoacacia* and *Pinus eldarica* on traffic decrease [J]. *Int J Environ Sci*, 2012, 1(2): 213–224.
- [53] Zhang W Q, Liu J W, Hu H Y, et al. Effect of the construction of green belts on the attenuation of traffic noise along the urban trunk roads in Xiamen City [J]. *Subtrop Plant Sci*, 2009, 38(4): 74–78.
张万旗, 刘俊伟, 胡宏友, 等. 厦门市交通主干道绿化带结构及其减噪效果研究 [J]. *亚热带植物科学*, 2009, 38(4): 74–78.
- [54] Lu X L, Liu Y, Su Z F, et al. Discuss the effect of city greenbelt on weakening the environmental noise [J]. *Shihezi Sci Techn*, 2003(5): 17–18.
陆旭蕾, 刘艳, 粟志峰, 等. 城市绿地对减弱环境噪声作用的探讨 [J]. *石河子科技*, 2003(5): 17–18.
- [55] Rosa M S, Constanza R, Luis M G, et al. Control of noise by trees arranged like sonic crystals [J]. *J Sound Vib*, 2006, 291(1/2): 100–106.
- [56] 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.
- [57] van Renterghem T, Botteldooren D. Numerical evaluation of tree canopy shape near noise barriers to improve downwind shielding [J]. *J Acoust Soc Amer*, 2008, 123(2): 648–657.
- [58] Bolin K. Prediction method for wind-induced vegetation noise [J]. *Acta Acust Unit Acust*, 2009, 95(4): 607–619.
- [59] Deepak S, Amit P, Srivastava A K, et al. The effects of meteorological parameters in ambient noise modeling studies in Delhi [J]. *Environ Moint Assess*, 2013, 185(2): 1873–1882.
- [60] Arnold T, Michelle E S. Numerical model to calculate microphysical influences on sound wave propagation in forests [J]. *Appl Acoust*, 2009, 70(6): 857–867.
- [61] Arnod T. Numerical experiment to revisit micrometeorology and sound speed calculation in forests [J]. *Meteor Atmos Phys*, 2010, 107(3/4): 103–108.
- [62] Lau M C, Lee C S Y, Boeker E R, et al. FHWA Traffic Noise Model, Version 2.5: User's Guide Addendum [R]. Cambridge, MA: Volpe National Transportation Systems Center Acoustics Facility, 2004.
- [63] Hastings A L, Rochat J L. Ground and Pavement Effects Using FHWA's Traffic Noise Model, Version 2.5 [R]. Cambridge, MA: Volpe National Transportation Systems Center Acoustics Facility, 2010.
- [64] Department of transport and welsh office UK (Do T UK). Calculation of Road Traffic Noise [R]. London: HMSO, 1988.
- [65] Road construction section of the Federal Ministry for Transport (RCSFMT). Directives for Anti-noise Protection along Roads [R]. Berlin: RCSFMT, 1990.
- [66] Tarrero A I, Martín M A, González J, et al. Sound propagation in forests: A comparison of experimental results and values predicted by the Nord 2000 model [J]. *Appl Acoust*, 2008, 69(7): 662–671.
- [67] JTGB03–2006, 公路建设项目环境影响评价规范 [S].
- [68] Guo X P, Peng H Y, Wang L. The effects of traffic noise attenuation by green belts [J]. *J Environ Sci*, 2009, 29(12): 2567–2571.
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.
- [69] Du Z Y, Xing S J, Song Y M, et al. Study on traffic noise attenuation by green belts along expressway [J]. *Ecol Environ*, 2007, 16(1): 31–35.
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.
- [70] Beranek L L. *Noise and Vibration Control* [M]. New York: McGraw-Hill, 1971: 110–115.
- [71] Xie B L. The influence of greenbelt on traffic noise [J]. *Shanxi Sci Techn*, 2003(4): 31–32.
解宝灵. 绿化带对交通噪声的影响 [J]. *山西科技*, 2003(4): 31–32.
- [72] 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.
- [73] Karima D, Ewa B A. Urban institutional and ecological footprint: A new urban metabolism assessment tool for planning sustainable urban ecosystems [J]. *Man Environ Qua*, 2010, 21(1): 78–82.
- [74] Cannon M, Kourvaritakis B, Huang G. Modeling and optimization for sustainable development policy assessment [J]. *Eur J Oper Res*, 2005, 164(2): 475–478.
- [75] Zhang W H. Evaluation on development management of eco-cities based on the index-weight determination model named model G1 [J]. *China Popul, Res Environ*, 2012, 22(5): 81–86.
张文辉. 基于G1赋权模型的生态城市发展管理评价 [J]. *中国人口资源与环境*, 2012, 22(5): 81–86.
- [76] Chen L H, Yao J S, Mo J Q. Asymptotic solution for generalized Lotke-Volterra nonlinear ecological [J]. *Acta Sci Nat Univ Nankai*, 2011, 44(6): 62–67.
- [77] Zu Y G, Ma K M, Zhang X J. A fractal method for analysing spatial heterogeneity of vegetation [J]. *Acta Ecol Sin*, 1997, 17(3): 333–337.
祖元刚, 马克明, 张喜军. 植被空间异质性的分形分析方法 [J]. *生态学报*, 1997, 17(3): 333–337.
- [78] Jorgensen S E, Bendoricchio G. *Fundamentals of Ecological Modelling* [M]. 3rd ed. Oxford: Gulf Professional Publishing, 2001: 25–28.