DOI: 10.5846/stxb202108042131
任飞虹,白骅,邱兆文,田顺.改善颗粒物污染的道路绿地植被屏障研究进展.生态学报,2022,42(13):5177-5186.
Ren F H, Bai H, Qiu Z W, Tian S.Research progress on roadside vegetation barriers for reducing particulate matter pollution.Acta Ecologica Sinica,2022,42(13):5177-5186.

改善颗粒物污染的道路绿地植被屏障研究进展

任飞虹[1,*],白 骅[1],邱兆文[2],田 顺[2]
1 长安大学建筑学院, 西安 710061
2 长安大学汽车学院, 西安 710064

摘要:减少道路环境的颗粒物污染对通勤者的健康至关重要。道路绿地在交通排放和邻近区域之间形成屏障,但这种植被屏障是否可以有效消减局部颗粒物污染仍然需要深入研究和探讨。结合现有研究成果,阐述了植被对颗粒物污染的影响途径;分析了街道峡谷和开放道路两种典型城市道路环境中,植被组成及群落结构设计的关键特征对颗粒物分布和扩散的影响;总结了有利于消减颗粒物浓度的植被单株性状和叶片微形态;探讨了影响颗粒物浓度的其他因子的耦合作用;针对不同道路环境提出了有效的植被屏障设计建议,并指出了植被群落设计和叶片微形态方面的研究趋势,以期优化道路植被规划,改善路域空气质量。
关键词:颗粒物污染;开放道路;街道峡谷;植被屏障;叶片微形态

Research progress on roadside vegetation barriers for reducing particulate matter pollution

REN Feihong[1,*], BAI Hua[1], QIU Zhaowen[2], TIAN Shun[2]
1 *School of Architecture, Chang'an University, Xi'an* 710061, *China*
2 *School of Automobile, Chang'an University, Xi'an* 710064, *China*

Abstract: In roadside environment, it is critical to reduce airborne particulate pollution for the commuters' health. Urban road vegetation would form a barrier between traffic emissions and adjacent areas, but whether roadside vegetation barrier can reduce nearby particulate pollution remains uncertain. Combined with the existing research, the influence mechanism of vegetation on particulate pollution was expounded. The effects of key characteristics of roadside vegetation composition design on particle distribution and diffusion in street canyon and open road environments were discussed respectively. The individual plant traits and leaf morphology that helps to reduce the particle concentration were summarized. The coupling effect of other factors affecting particle concentration was analyzed. Additionally, the recommendations for vegetation barrier design in different road environments are proposed, and the research trends in vegetation community design and leaf morphology are raised. It is hoped that the research results would be used to optimize the roadside vegetation planning and improve the air quality in nearby environment.

Key Words: particulate pollution; open road; street canyon; vegetation barrier; leaf morphology

空气污染是一个重大的全球性问题,影响当今世界人民的健康。颗粒物(particulate matter, PM)是全球城市环境的主要空气污染物之一。世界卫生组织根据空气动力学直径将其分为粗颗粒物(coarse particles,

基金项目:陕西省自然科学基础研究计划项目(2021JQ-225);陕西省重点研发计划项目(2021SF-496);国家自然科学基金面上项目(52072045);长安大学中央高校基本科研业务费专项资金(300102410103)
收稿日期:2021-08-04; **网络出版日期**:2022-03-18
* 通讯作者 Corresponding author.E-mail: feihong_ren@chd.edu.cn

PM_{10}),细颗粒物(fine particles, $PM_{2.5}$)和超细颗粒物(ultrafine particles, $PM_{0.1}$)[1]。PM_{10}既有自然来源,也有人为来源,但 $PM_{2.5}$和 $PM_{0.1}$几乎都是人为来源(包括住宅供暖和交通排放等)[1—2]。颗粒物对公众健康有负面影响,特别是小颗粒物对人体健康的风险更大,因为它们可以深入肺泡,影响神经系统,甚至进入血液[3]。颗粒物污染还会影响包括气候和农业在内的生态系统,并产生严重的经济代价[3—4]。近些年,虽然空气质量得到部分改善,但全球 84%人口仍然暴露在超过世卫组织指南的颗粒物水平中[1],持续的高空气污染水平将进一步导致严重的健康影响[5—6]。

作为颗粒物污染的主要来源,与交通相关的颗粒物一直是研究人员关注的主要焦点[7—11]。在城市地区,绿色出行方式(步行、骑行)的倡导却增加了交通污染对公共健康的威胁[12]。为了更好地实现人口可持续性,道路绿地作为屏障在城市中被广泛建设,并越来越多地被纳入城市规划[13]。植被可以成为减轻空气污染的有效工具,如路侧植被屏障后的空气污染水平降低[14—15],植被屏障增加颗粒物的沉积和清除量[16—17];同时植被可以在生态系统的多个方面发挥作用,如减轻气候变化的影响[18],缓解城市热岛[19—20],减少噪音污染[21—22],以及改善人口健康状况(如降低死亡率、提高出生率、减少肥胖率)[19,23—24]。然而,也有研究表明绿地植被会导致空气质量恶化,如在街道峡谷中建造植被可能导致颗粒浓度增加 0% — 99.7%[25—26],茂密的行道树甚至会使人行道上的 PM_{10}和 $PM_{2.5}$浓度分别增加 123%和 72%[27],而且行道树会增加街道行人的气体污染物暴露[28],密集的绿化带导致局部二氧化氮浓度增加[29]。

道路绿地是否可以改善局部颗粒物污染仍没有定论,且植被屏障的最佳配置和植物构成尚不清楚。本文旨在深入梳理总结街道峡谷和开放道路两种典型的道路绿地植被对颗粒物污染的影响,并提出改善对策和植被屏障设计建议,优化道路绿地的植被规划,降低路侧环境的颗粒物污染水平。

1 植被对颗粒物污染的影响途径

植被对空气颗粒物污染的影响主要通过三个基本途径[30]:(1)通过沉积作用消减颗粒物。园林植物叶和茎表面可滞留空气中的颗粒物,这些颗粒物通过再悬浮、雨水冲刷或叶子脱落等从植物冠层中去除,达到净化空气的作用[31]。利用沉积速度可估算植被在城市或局地范围内清除的总颗粒物[32]。一种广泛使用的软件 i-Tree (https://www.itreetools.org/)可通过估算树叶的沉积量来评估城市树木的效益[33]。(2)通过改变气流影响颗粒物的扩散。目前植被的空气动力学效应已广泛用于道路附近的微环境,尤其是利用道路绿地局地气流的变化有效改变局部空气质量[23, 34—37]。在城市尺度上,空气动力效应是影响颗粒物污染的最重要因素,通过扩散作用消减 $PM_{2.5}$污染甚至比沉积更有效[38]。而在街道尺度上,通过沉积减少的颗粒物浓度会被街谷中植被对气流的阻塞效应抵消,导致更大的颗粒物污染浓度(尤其是 PM_{10})[39]。(3)植物在生长发育过程中,本身释放生物类颗粒物和挥发性化合物。但是在考虑城市环境的空气质量的传统研究中,植被的生物排放通常被忽略,因为与人为污染源相比,它通常微不足道[40],其对微尺度空气质量的影响有待进一步阐明。

2 植被组成及群落结构设计

植被屏障改善颗粒物污染的复杂性是由多种混杂因素造成的。植物的复杂多孔结构通过捕获颗粒物或改变空气流动来改变道路附近的空气污染水平[41—42]。因此,植被类型、高度和厚度等特征都会影响场地内气流变化和污染物沉积,且空气流动和植被沉降作用在街道峡谷和开放道路也有本质不同[39, 43]。

2.1 植被屏障高度

在种植空间有限的城市地区,只有从地面到冠层全覆盖的低矮密集植被屏障才能有效减少空气污染。树冠下有开口的观赏树木会导致下风向 $PM_{2.5}$浓度更高,同时降低风速[44]。类似于固体噪声屏障的绿色屏障,可以更好地阻碍来自道路的气流,降低人行道的颗粒物浓度。在街道峡谷内,随着树冠高度增加,树冠对空气流场的阻滞和拖拽作用随之增强,进入街道峡谷内的空气流场强度减弱,特别是树冠高度超过建筑物高度后,漩涡中心难以进入到街道峡谷内,流场强度越弱污染物积累越明显[45—46]。当植被屏障整体高度低于建筑物

时,屏障高度对污染物的扩散影响不大,如在平行风向的街谷,当绿篱高度在 0.9m 以下,随绿篱高度增加,人行道 PM_{10}浓度下降,而当绿篱高度达到 0.9m 后继续增加,人行道 PM_{10}浓度不再降低[47]。但是当高度接近甚至超过建筑物高度后,会导致污染物积累明显加重[11, 46]。因此,较高的绿色屏障可降低人行道的污染物浓度(因为更好的屏蔽)[18, 48],而较高的植被屏障会增加颗粒物浓度。

植被屏障在开放道路和在街道峡谷中的作用不同。行道树和其他植被为道路和邻近人群之间提供了一道屏障,这种屏障效应导致颗粒物在植被迎风面积累[49]。在植被屏障的下风处,也就是在植被的后面,形成一个尾流区,颗粒物浓度随着与道路距离的增加而降低。植被屏障高度通常 4m — 5m 或更高时,超过邻近道路上运行的典型机动车的排放高度,会迫使污染物不断上升或穿过植被,植被屏障背后的空气污染量明显减少,但植被高度低于大约 4m 时,污染物可在低屏障下风处无阻排放[49—50]。

2.2　植被屏障厚度

植被屏障的厚度为截获或扩散的颗粒物提供停留时间,并起到减少湍流、降低风速、增加气流阻塞的作用。植被厚度迫使气流通过屏障的距离变长,同时增加从污染源到下风向行人的距离。街道峡谷内,随着植被屏障厚度增加,植被边界与建筑物之间的空间距离减小,阻碍气流进入街道峡谷内的下洗通道,同时漩涡从街道峡谷流出的上洗通道空间减小,使空气流场强度被二次减弱,继而加重颗粒物的积累。这和街谷内植被屏障高度增加时所表现的趋势一致[46]。

植被屏障厚度是开放道路绿地的主要物理特征,对开放道路上近路植被屏障厚度的影响进行模拟、试验和实地调查,发现随着植被屏障厚度和高度的增加,污染物消减效率会进一步提高[50],一般植被屏障最小约 5m 厚,最佳厚度接近 10m 或更厚(图 1)[51—53]。此外,有研究利用下风向峰值浓度点到源路的距离(distance to maximum concentration, DMC)计算有效的植被屏障厚度,在 DMC 后设置植被屏障或增加 DMC 后的屏障厚度,可提高颗粒物消减效率[51]。有效降低空气污染所需的屏障厚度也与植被的孔隙度或密度有关。

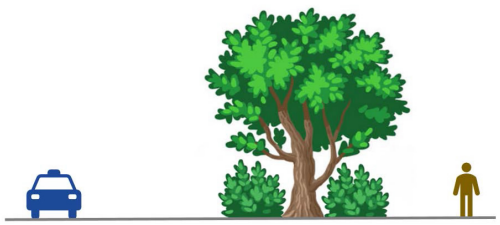


图 1　开放道路环境中的植被屏障示意图

Fig.1　Schematic diagram of vegetation barrier in open road environment

2.3　密度/孔隙度

植被屏障的密度或孔隙度决定屏障内部的空气流动。植被密度通常用叶面积密度(leaf area density, LAD)、叶面积指数(leaf area index, LAI)、冠层密度(canopy density, CD)和孔隙度来表示。在街道峡谷,植被密度或孔隙度是研究离散度和/或沉积度的重要植被特征[34, 54]。虽然过去的研究分析了密度参数之间的关系,但未来在研究沉积和扩散时,这些参数还需要标准化选择[25, 55]。CD 和 LAI 主要影响街谷 $PM_{2.5}$的日变化,稀疏和中等 CD 可降低颗粒物浓度[54],为了平衡绿色街道的环境效益和景观效益,CD 和 LAI 的最佳范围分别为 50% — 60%和 1.5 — 2.0[56]。LAD 的一般考虑范围为 0.2 m^2/m^3— 5.12 m^2/m^3[41—42],街谷内颗粒物的积累随着 LAD 的增加而增加,这是因为增加 LAD 虽然会在一定程度上增加植物的吸附能力,但是其空气动力学效应带来的流场变化将最终导致街谷内污染物浓度的上升[57],LAD 达到 3 m^2/m^3之后继续增大,PM_{10}浓度不再明显升高[47]。当植被孔隙度减小,街谷内气流速度逐渐降低[58],颗粒物在街道峡谷内积累[59]。未来进一步评估风向、街谷高宽比和 LAD 的关系才能更好地组合这些变量。

在开放道路,颗粒物消减效率随着 CD, LAD, LAI 和郁闭度的增加而提升,随着孔隙度的增加而降低[50, 60—63]。有效降低污染的 LAD 在不同的屏障厚度条件下的消减效果不同[64]。为了减少 50%以上总悬浮颗粒物(total suspended particles, TSP),并保持健康的绿化带,CD 和郁闭度的最佳范围为 70% — 85%[63, 65]。植被孔隙度增加,风速降低,接近地面的颗粒物浓度增加。消减 TSP 和 PM_{10}的最佳防护林孔隙度分别为 20% — 40%和 10% — 20%[60, 62]。当防护林孔隙度为 15%时,PM_{10}消减效率最高[66]。当 CD 达到 85%以上,孔隙

度达到 40%,植被不再是多孔渗透结构,而类似坚实的固体屏障影响颗粒物的扩散,污染物消减效率不再提升[18, 62]。

2.4 群落结构

在街道峡谷,行道树会降低街道上的风速,仅种植乔木会显著增加人行道的颗粒物浓度[41]。虽然绿篱也降低街道峡谷内的风速,但对风速的影响小于乔木[42],绿篱通过产生局部涡旋,将颗粒物转移到人行道[43, 48]。种植绿篱会减少 24% — 61%的污染物暴露。低渗透性和高大绿篱对减少人行道的颗粒物效果较好,而与道路两侧的绿篱相比,街道峡谷中央的单一绿篱可以最大程度消减颗粒物浓度(图 2)[43, 67]。通过评估绿篱对风速和街谷高宽比的敏感性,可以模拟获得绿篱的最佳高度。在理想街谷模拟研究中,绿篱的最佳高度范围在 0.9—2.5m[48]。但仍需要在不同的街道高宽比下进行研究,总结不同环境下绿篱的合适高度。

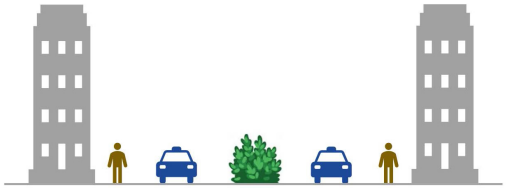


图 2 街道峡谷环境中的植被屏障示意图

Fig.2 Schematic diagram of vegetation barrier in built-up street canyon environment

开放交通廊道沿线的植被对颗粒物消减作用的研究中,任何植被类型都可以消减 TSP 浓度,而灌木(绿篱)、乔木-灌木和乔木-草本组合对 $PM_{2.5}$浓度的消减效果较好;单一乔木可以消减 TSP 污染,但无法消减 $PM_{2.5}$污染[50, 60]。灌木-小乔木组合和乔木-灌木-草本组合分别在主干道和次干道上对 PM_{10}具有最大消减效率[66]。使用绿篱或乔木-灌木(绿篱)组合是降低植被屏障后颗粒物浓度的有利选择[14, 68]。

综上,植被效应是由建筑环境的几何形状决定的。在街道峡谷,如果没有充分规划植被配置,可能会恶化空气质量[20, 26,41—42]。而在开放道路环境中,乔木-灌木组合的高密度植被可作为改善空气质量的屏障[10, 14, 62, 69]。

3 植被物种选择

植物表面滞留的颗粒物或在湍流中重新悬浮在大气中,或被降水冲走,或随着树叶和树枝掉落到地面[70]。这些颗粒物可能会影响局地的空气、水和土壤,在选择物种时,需要考虑植被周围的土地用途。同时,某些物种能更有效地净化空气质量,在考虑植物屏障的设计时,应尽可能选择最优的植被物种。另外,应注意所选物种能否在特定区域保持良好长势。

3.1 叶片物候格局

叶片物候描述叶片从萌动生长到衰老落叶的周期性活动,常绿树种在全年都保留有功能的叶片,而落叶树种通常在冬季或旱季缺少功能性叶片。由于叶片在颗粒物沉积中具有重要作用,绿地植被的叶片寿命决定了沉积作用的时间长短。因此,在沉积效应方面,常绿树种比落叶树种更有利,叶季较长的落叶树种优于叶季较短的落叶树种[71]。然而,常绿树种可能比落叶树种更容易受到某些环境胁迫(如气候变暖)[72],对可持续的生态系统具有潜在影响。如果全面了解局地尺度污染物随时间的通量,可以根据最合适的叶片物候格局选择树种。然而,这样狭窄的树种选择标准会忽视植被提供的其他生态服务(如降低城市热岛效应[19]),以及植被提供的重要心理和社会效益[73]。

3.2 叶片形态

叶片大小和形态差异是影响颗粒物沉积的重要因子。通常小叶树种比大叶树种对降尘更有效[74]。在沉积交通污染相关颗粒物的叶片特征研究中,叶片大小在颗粒物沉积中具有重要作用,且叶片大小与颗粒物积累呈负相关[75]。针叶树种比阔叶树种具有更高的沉积速度[16, 76],更有助于减轻街谷内空气污染程度[57];针叶树种中,松类比柏类具有更高的沉积效率[77]。这可能是由于长而窄的针叶缩短了扩散路径,导致相对较小的沉积阻力[76]。

对于阔叶树种,虽然叶片形状对颗粒物沉积的影响程度小于叶片表面特征,但叶片形状确实会影响颗粒物的沉积[77—78]。许多研究发现,复杂形状的叶片通常比简单形状的叶片对颗粒物沉积更有效[78—79],这可能是由于叶片形状对叶片周围气流的影响不同[80]。因此,针状、小而复杂的叶片比其他类型的叶片具有更大的颗粒物沉积潜力,建议进一步细化研究不同针叶形状的沉积效果。

3.3　叶表面特征

叶片的某些表面特征对沉积有积极影响。一般来说,粗糙的叶表面比光滑的叶表面更有效[2, 70, 81]。毛状体、表皮蜡质、表面脊状和气孔都是对颗粒物沉积有利的微观形态特征[71, 82—84]。毛状体是颗粒沉积最有效的微形态特征[78, 80]。$PM_{2.5}$沉积量与叶片毛状体之间明显相关[76],与沟槽比例和气孔大小呈正相关[84]。阔叶树种的沉积随着叶表面微粗糙(以叶面沟槽和脊纹为特征)的增加而增加[71],针叶树种(松柏科)的气孔密度和表皮蜡质含量与沉积量增加呈明显相关[85]。而且在叶片对颗粒物沉积过程中,表皮蜡质超微结构也很重要[74,85—86]。此外,叶表面微结构对滞留不同粒径颗粒物和物相组成具有选择性,叶片的纹理、叶脉间的槽深、气孔开孔可镶嵌或附着不同粒径的颗粒物[81, 87]。因此,粗糙的叶片表面(包括毛状体、沟槽和脊纹)比光滑表面更有利于颗粒物沉积,表皮蜡质和气孔性状也对颗粒物沉积起着重要的作用。

3.4　树冠形态

树冠形态对局部风环境具有重要影响。对单株阔叶树模型和针叶树模型进行风洞测试,发现锥形的针叶树在较低位置对风有较大阻碍,近似圆形的阔叶树在冠层中间位置对风的阻碍更强。低冠幅和孔隙度小的阔叶冠形树木,可保证街道峡谷下方的空气流通,降低 PM_{10}的积累[67]。此外,不同风向条件下树冠形态对颗粒物浓度的影响不同,垂直风向下,球形树冠能更好控制街谷背风侧高浓度污染,卵形、倒卵形、伞形其次,而塔型和圆柱形效果最差;平行风向和倾斜风向下,倒卵形树冠效果最好,圆柱形、卵形、球形其次,而伞形和塔形效果最差[47]。

3.5　植被的释放物质

植物在生长发育过程中会释放生物颗粒物(如孢子和花粉)和生物挥发性有机化合物(如异戊二烯、萜烯、烷烃等)。i-Tree 模型提供了世界各地多种植被的空气排放数据[88]。释放大量花粉的树种会增加过敏和哮喘的发病率[73]。因此,在城市道路绿地规划选择树种时,花粉过敏原应该是一个重要的考虑因素[89]。在改善空气质量的种植计划中,特别是在弱势群体(如学龄儿童)经过的地方,应避免选择具有这一特征的树种。

生物挥发性有机化合物经过大气氧化,与氮氧化物结合会形成地面臭氧,这是一种对人类呼吸系统和心血管系统有急性和慢性影响的有毒气体[90];其氧化还会产生二次有机气溶胶,增加环境颗粒物浓度,对人类健康产生负面影响[91]。但挥发性有机化合物对微尺度空气质量的影响仍有待进一步阐明。

3.6　环境胁迫的耐受性

城市道路环境会对植被造成极大的压力。因此,植物对相关环境压力的耐受性作为适宜性指标,应优先于其他功能[92]。如果植被缺乏环境胁迫的耐受性,无法保持个体的完整性,会在屏障中形成缺口,无法有效消减颗粒物浓度,甚至可能导致颗粒物浓度增加。如松树虽然对降尘特别有效,但空气污染会降解松树针叶表皮蜡质,因此在污染严重的地点,松树可能缺乏长期生存能力[93]。同样,气孔导度低的植物虽然可忍受较高水平的气体污染,但对气体污染物的消减效率较低,因此可能更适合消减颗粒物污染的地方。气孔周围的微形态结构,包括蜡环和角质层拱,也可能有助于保护植物,免受颗粒物污染的胁迫。

4　其他影响因子的耦合

道路绿地植被对颗粒物污染的影响,受到其他因子的耦合作用,特别是道路特征和气象因素。

街道峡谷的高宽比与植被特征之间存在复杂的关系。由于空气流动模式的改变,高宽比显著影响污染物扩散[94—96]。在街谷植被研究中,根据街道高宽比(aspect ratio, H/W),一般将街谷分为中等街谷(0.5<H/W<

2),深街谷(H/W≥2)和浅街谷(H/W≤0.5)[97]。在没有植被的街道峡谷中,高宽比较大的街谷中污染物浓度更高,这主要是由于深街谷的风速减小,导致颗粒物持续积累[39]。在中等街谷,污染物的主要消减机制是涡流。在深街谷,漩涡会分裂成两个,导致消减街道污染物效果变差。如在植被布局结构相同的情况下,高宽比越小,即街道越宽阔,PM_{10}浓度下降越明显;反之越高[98]。

街道峡谷的空气质量受湿度、温度、风速和风向等气象因素的影响。空气湿度是影响街谷颗粒物浓度最重要的因子之一[95],如严寒地区城市街谷底层 PM_{10}浓度与气象参数显著相关,其相关性顺序依次为湿度>温度>风速[99]。温度主要影响街谷的垂直对流运动,温度越高对流越强,局部颗粒物浓度下降越明显[57]。街谷内颗粒物浓度与风速呈负相关[100],且风速是影响街道峡谷 $PM_{2.5}$衰减的最显著因子之一[56]。风速越大,颗粒物聚集程度越低,不同粒径颗粒物浓度差异越小,其中 PM_{10}和 $PM_{2.5}$的扩散受风速影响最明显;风速达到9.35m/s后,继续增大风速对削弱颗粒物聚集的效果不大[46]。另外,街道峡谷内研究的典型风向包括垂直风向、平行风向和倾斜风向(图3),不同风向的风速降低会导致污染物浓度出现不同程度增加。种植乔木的街道峡谷中,在垂直风向下,街谷背风侧浓度较高,迎风侧浓度较低[101];在平行风向和倾斜风向下,街谷两侧的污染物浓度都增加[39, 42]。不过,也有研究与上述街道峡谷污染分布相矛盾的结果。例如,伦敦市中心马里波恩社区案例中,平行风向下植被会降低颗粒物浓度[45]。

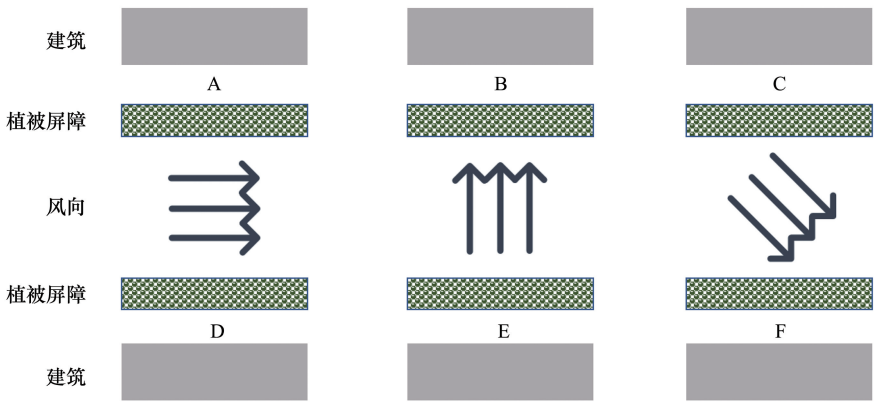


图 3 街道峡谷走向与主导风向关系示意图

Fig.3 Schematic diagram of relationship between street canyon trend and dominant wind direction

A 和 D:平行风向的两侧 Either side of a parallel wind direction,B 和 F:迎风侧 Windward side,E 和 C:背风侧 Leeward side

开放道路的空气质量也受湿度、风速、风向和温度等气象因素的影响[37]。细颗粒物($PM_{2.5}$和 PM_1)与气象因素之间的相关系数大于粗颗粒物(TSP 和 PM_{10})[102]。以往研究表明,相对湿度对 PM_{10}衰减的影响最大,风速次之,温度影响最小[66]。对风向的研究主要集中在评估垂直风条件下的污染物浓度,而不同风向会影响植被屏障后颗粒物减少幅度[14]。在气候温暖的地区,如中国、孟加拉国,通过植被屏障可以显著降低污染物浓度[9, 60, 62, 82],而在气候寒冷的地区(如芬兰),植被影响污染物水平有限甚至没有影响[103]。

植被屏障的各项设计参数(高度、宽度、密度/孔隙度和群落结构等)不仅相互关联,而且与其他外部因素密切相关。植被屏障高度要根据植物种类或规划要求确定;屏障宽度受种植空间的限制;植被最佳密度随屏障宽度的不同而不同;植被孔隙度受风速影响产生变化[34],相同植被组成的屏障孔隙度也会因立地条件(光照、温度、湿度、土壤等)影响而不同。此外,人为管理下的植被密度可能与在自然界或相对不受管理的植被密度有很大不同。因此,种植后利用管理干预来调节植被屏障的密度/孔隙度可能更有效。

5 展望

道路绿地虽然可用于局部尺度上减少颗粒物污染,但主动控制(减少排放)仍然是跨尺度上最有效的策

略。道路绿地的建设应该考虑特定场地环境因素[35, 104],如道路周围的建筑环境形态、气象因素(如风速和风向)和当地植被特征等[35, 105],并将植被的空气动力学效应和沉积效应结合起来,用于改善空气质量。

(1)对于街道峡谷,仅种植乔木通常对空气质量有负面影响,而绿篱由于阻碍底部空气流动,通常对颗粒物污染表现出积极作用。街道峡谷空气质量的改善与否取决于高宽比、植被密度和风向的组合。在中等街谷,可种植低矮植被(如绿篱);在浅街谷,可种植冠幅较小和间距较大的乔木;在深街谷,推荐类似于固体噪声屏障的绿色屏障。目前对街道峡谷中绿篱的研究数量有限,未来需要对不同高宽比和气象条件下适宜的绿篱尺寸和密度开展更多研究。

(2)对于开放道路,浓密高大的植被屏障对空气质量有积极的影响。在靠近道路和羽流最大浓度处设置植被屏障,可以有效消减污染物。距离道路越远的地方需要越高的屏障,以屏蔽污染物通量。在空间允许的情况下,可采用高密度植被(如乔木-绿篱组合)。植被覆盖度应从地面开始,延伸整个屏障。相对湿度对植被屏障消减颗粒物污染有显著影响,因此种植设计需要考虑气象和气候因素。不同气候地区植被对空气质量的影响存在差异,还需要进一步研究。

(3)在评估植被对空气颗粒物影响时,尤其在大规模种植计划中应考虑某些植物的生物性污染。植物叶原基为空气真菌的生长繁殖提供基质、植物大量排放花粉,会增加空气生物颗粒物污染;而植物大量排放挥发性有机化合物会增加二次有机气溶胶浓度,但同时也具有抑菌杀菌等环境效益,对于改善空气质量的道路绿地规划十分重要。建议进一步研究不同植物的挥发性有机化合物对微尺度空气质量的影响。

(4)在选择树种时,针状、小而复杂的叶片比其他类型的叶片形态更能有效沉积颗粒物。高气孔密度,高表皮蜡质含量(特别是针状叶)和能提升叶片粗糙度的特征(如毛状体、沟槽和脊纹)是对沉积更有利的叶片表面特征。建议进一步研究适合温带城市环境的树种叶片微形态,并针对微形态对颗粒物的影响,提供相关的树种数据。

参考文献(References):

[1] WHO. Ambient Air Pollution: A Global Assessment of Exposure and Burden of Disease. Geneva: World Health Organization, 2016.

[2] He C, Qiu K Y, Pott R. Reduction of urban traffic - related particulate matter—leaf trait matters. Environmental Science and Pollution Research, 2020, 27(6): 5825-5844.

[3] 朱晓晶, 钱岩, 李晓倩, 李志刚, 郭辰, 王占山, 魏永杰. 黑碳气溶胶的研究现状: 定义及对健康、气候等的影响. 环境科学研究, 2021, 34(10): 2536-2546.

[4] Jimoda L A. Effects of particulate matter on human health, the ecosystem, climate and materials: a review. Facta Universitatis-Series: Working and Living Environmental Protection, 2012, 9(1): 27-44.

[5] 宋丽莹, 赵金镯. 大气细颗粒物对中枢神经系统的不良影响及作用机制. 卫生研究, 2020, 49(4): 684-688.

[6] Luo H P, Guan Q Y, Lin J K, Wang Q Z, Yang L Q, Tan Z, Wang N. Air pollution characteristics and human health risks in key cities of northwest China. Journal of Environmental Management, 2020, 269: 110791.

[7] Zheng T, Li B, Li X B, Wang Z Y, Li S Y, Peng Z R. Vertical and horizontal distributions of traffic-related pollutants beside an urban arterial road based on unmanned aerial vehicle observations. Building and Environment, 2021, 187: 107401.

[8] Wang Z Y, Zhong S Q, He H D, Peng Z R, Cai M. Fine-scale variations in $PM_{2.5}$ and black carbon concentrations and corresponding influential factors at an urban road intersection. Building and Environment, 2018, 141: 215-225.

[9] 杨貌, 张志强, 陈立欣, 刘辰明, 邹瑞. 春季城区道路不同绿地配置模式对大气颗粒物的削减作用. 生态学报, 2016, 36(7): 2076-2083.

[10] 郭晓华, 戴菲, 殷利华. 基于 ENVI-met 的道路绿带规划设计对 $PM_{2.5}$ 消减作用的模拟研究. 风景园林, 2018, 25(12): 75-80.

[11] 周姝雯, 高菲, 马克明. 基于 ENVI-met 模型的北京市典型道路行道树树种优化研究. 中国园林, 2020, 36(6): 141-144.

[12] He H D, Gao H O. Particulate matter exposure at a densely populated urban traffic intersection and crosswalk. Environmental Pollution, 2021, 268: 115931.

[13] Andersson-Sköld Y, Thorsson S, Rayner D, Lindberg F, Janhäll S, Jonsson A, Moback U, Bergman R, Granberg M. An integrated method for assessing climate-related risks and adaptation alternatives in urban areas. Climate Risk Management, 2015, 7: 31-50.

[14] Abhijith K V, Kumar P. Field investigations for evaluating green infrastructure effects on air quality in open-road conditions. Atmospheric Environment, 2019, 201: 132-147.

[15] Deshmukh P, Isakov V, Venkatram A, Yang B, Zhang K M, Logan R, Baldauf R. The effects of roadside vegetation characteristics on local, near-road air quality. Air Quality, Atmosphere & Health, 2019, 12: 259-270.

[16] Zhang L, Zhang Z Q, McNulty S, Wang P. The mitigation strategy of automobile generated fine particle pollutants by applying vegetation configuration in a street-canyon. Journal of Cleaner Production, 2020, 274: 122941.
[17] Abhijith K V, Kumar P. Quantifying particulate matter reduction and their deposition on the leaves of green infrastructure. Environmental Pollution, 2020, 265: 114884.
[18] Gallagher J, Baldauf R, Fuller C H, Kumar P, Gill L W, McNabola A. Passive methods for improving air quality in the built environment: a review of porous and solid barriers. Atmospheric Environment, 2015, 120: 61-70.
[19] Elmqvist T, Setälä H, Handel S N, van der Ploeg S, Aronson J, Blignaut J N, Gómez-Baggethun E, Nowak D J, Kronenberg J, de Groot R. Benefits of restoring ecosystem services in urban areas. Current Opinion in Environmental Sustainability, 2015, 14: 101-108.
[20] Ferrini F, Fini A, Mori J, Gori A. Role of vegetation as a mitigating factor in the urban context. Sustainability, 2020, 12(10): 4247.
[21] Salmond J A, Tadaki M, Vardoulakis S, Arbuthnott K, Coutts A, Demuzere M, Dirks K N, Heaviside C, Lim S, Macintyre H, McInnes R N, Wheeler B W. Health and climate related ecosystem services provided by street trees in the urban environment. Environmental Health, 2016, 15 Suppl 1(S1): S36.
[22] Berardi U, GhaffarianHoseini A, GhaffarianHoseini A. State-of-the-art analysis of the environmental benefits of green roofs. Applied Energy, 2014, 115: 411-428.
[23] 周姝雯, 唐荣莉, 张育新, 马克明. 城市街道空气污染物扩散模型综述. 应用生态学报, 2017, 28(3): 1039-1048.
[24] 童明坤, 高吉喜, 田美荣, 嵇萍. 北京市道路绿地消减 $PM_{2.5}$ 总量及其健康效益评估. 中国环境科学, 2015, 35(9): 2861-2867.
[25] Gromke C. A vegetation modeling concept for Building and Environmental Aerodynamics wind tunnel tests and its application in pollutant dispersion studies. Environmental Pollution, 2011, 159(8/9): 2094-2099.
[26] 胡杨, 马克明. 城市街道绿化对空气质量及微气候影响的综合模拟研究. 生态学报, 2021, 41(4): 1314-1331.
[27] Karttunen S, Kurppa M, Auvinen M, Hellsten A, Järvi L. Large-eddy simulation of the optimal street-tree layout for pedestrian-level aerosol particle concentrations: A case study from a city-boulevard. Atmospheric Environment: X, 2020, 6: 100073.
[28] Yang H Y, Chen T H, Lin Y Y, Buccolieri R, Mattsson M, Zhang M, Hang J, Wang Q. Integrated impacts of tree planting and street aspect ratios on CO dispersion and personal exposure in full-scale street canyons. Building and Environment, 2020, 169: 106529.
[29] Yli-Pelkonen V, Viippola V, Kotze D J, Setälä H. Greenbelts do not reduce NO_2 concentrations in near-road environments. Urban Climate, 2017, 21: 306-317.
[30] Xing Y, Brimblecombe P. Trees and parks as "the lungs of cities". Urban Forestry & Urban Greening, 2020, 48: 126552.
[31] 张灵艺, 秦华. 城市园林绿地滞尘研究进展及发展方向. 中国园林, 2015, 31(1): 64-68.
[32] Xie C K, Kan L Y, Guo J K, Jin S J, Li Z G, Chen D, Li X, Che S Q. A dynamic processes study of PM retention by trees under different wind conditions. Environmental Pollution, 2018, 233: 315-322.
[33] Song X P, Tan P Y, Edwards P, Richards D. The economic benefits and costs of trees in urban forest stewardship: a systematic review. Urban Forestry & Urban Greening, 2018, 29: 162-170.
[34] Janhäll S. Review on urban vegetation and particle air pollution – Deposition and dispersion. Atmospheric Environment, 2015, 105: 130-137.
[35] Abhijith K V, Kumar P, Gallagher J, McNabola A, Baldauf R, Pilla F, Broderick B, Di Sabatino S, Pulvirenti B. Air pollution abatement performances of green infrastructure in open road and built-up street canyon environments:a review. Atmospheric Environment, 2017, 162: 71-86.
[36] Buccolieri R, Santiago J L, Rivas E, Sanchez B. Review on urban tree modelling in CFD simulations: aerodynamic, deposition and thermal effects. Urban Forestry & Urban Greening, 2018, 31: 212-220.
[37] 王晓磊. 道路防护林内大气颗粒物时空变化规律研究[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2014.
[38] Jeanjean A P R, Monks P S, Leigh R J. Modelling the effectiveness of urban trees and grass on $PM_{2.5}$ reduction via dispersion and deposition at a city scale. Atmospheric Environment, 2016, 147: 1-10.
[39] Buccolieri R, Salim S M, Leo L S, Di Sabatino S, Chan A, Ielpo P, de Gennaro G, Gromke C. Analysis of local scale tree – atmosphere interaction on pollutant concentration in idealized street canyons and application to a real urban junction. Atmospheric Environment, 2011, 45(9): 1702-1713.
[40] Owen S M, MacKenzie A R, Stewart H, Donovan R, Hewitt C N. Biogenic volatile organic compound (voc) emission estimates from an urban tree canopy. Ecological Applications, 2003, 13(4): 927-938.
[41] Vos P E J, Maiheu B, Vankerkom J, Janssen S. Improving local air quality in cities: to tree or not to tree? Environmental Pollution, 2013, 183: 113-122.
[42] Wania A, Bruse M, Blond N, Weber C. Analysing the influence of different street vegetation on traffic-induced particle dispersion using microscale simulations. Journal of Environmental Management, 2012, 94(1): 91-101.
[43] Gromke C, Jamarkattel N, Ruck B. Influence of roadside hedgerows on air quality in urban street canyons. Atmospheric Environment, 2016, 139: 75-86.
[44] Tong Z M, Whitlow T H, MacRae P F, Landers A J, Harada Y. Quantifying the effect of vegetation on near-road air quality using brief campaigns. Environmental Pollution, 2015, 201: 141-149.
[45] Jeanjean A P R, Buccolieri R, Eddy J, Monks P S, Leigh R J. Air quality affected by trees in real street canyons: the case of Marylebone neighbourhood in central London. Urban Forestry & Urban Greening, 2017, 22: 41-53.

[46] 王雪艳. 基于道路绿化带影响的街道峡谷内尾气扩散的数值模拟[D]. 济南: 山东大学, 2015.
[47] 任思佳. 城市街谷绿化形式对机动车尾气扩散影响的数值模拟研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2018.
[48] Li X B, Lu Q C, Lu S J, He H D, Peng Z R, Gao Y, Wang Z Y. The impacts of roadside vegetation barriers on the dispersion of gaseous traffic pollution in urban street canyons. Urban Forestry & Urban Greening, 2016, 17: 80-91.
[49] Al-Dabbous A N, Kumar P. The influence of roadside vegetation barriers on airborne nanoparticles and pedestrians exposure under varying wind conditions. Atmospheric Environment, 2014, 90: 113-124.
[50] 顾康康, 钱兆, 方云皓, 孙圳, 温红. 基于 ENVI-met 的城市道路绿地植物配置对 $PM_{2.5}$ 的影响研究. 生态学报, 2020, 40(13): 4340-4350.
[51] Morakinyo T E, Lam Y F. Simulation study of dispersion and removal of particulate matter from traffic by road-side vegetation barrier. Environmental Science and Pollution Research, 2016, 23(7): 6709-6722.
[52] 李新宇, 赵松婷, 李延明, 郭佳, 李薇. 北京市不同主干道绿地群落对大气 $PM_{2.5}$ 浓度消减作用的影响. 生态环境学报, 2014, 23(4): 615-621.
[53] 徐欢, 赵晶晶, 李红. 道路绿地植物配置对 $PM_{2.5}$ 浓度分布与消减作用的影响. 北方园艺, 2016, (24): 65-69.
[54] Wang X S, Teng M J, Huang C B, Zhou Z X, Chen X P, Xiang Y. Canopy density effects on particulate matter attenuation coefficients in street canyons during summer in the Wuhan metropolitan area. Atmospheric Environment, 2020, 240: 117739.
[55] 陈小平, 汪小爽, 周志翔. 道路绿化隔离带消减颗粒物效应及配置参数研究. 中国园林, 2019, 35(8): 110-114.
[56] Jin S J, Guo J K, Wheeler S, Kan L Y, Che S Q. Evaluation of impacts of trees on $PM_{2.5}$ dispersion in urban streets. Atmospheric Environment, 2014, 99: 277-287.
[57] 甘振涛. 城市典型街谷中不同绿化模式对污染物扩散影响的数值模拟研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2020.
[58] 罗昔联, 王乐, 顾兆林. 树冠特征对城市街谷内流场及污染物扩散影响的数值模拟研究. 应用力学学报, 2021, 38(5): 1981-1988.
[59] 郝彩红. 城市道路绿化隔离带对交通颗粒物的影响研究[D]. 西安: 长安大学, 2019.
[60] Chen L X, Liu C M, Zou R, Yang M, Zhang Z Q. Experimental examination of effectiveness of vegetation as bio-filter of particulate matters in the urban environment. Environmental Pollution, 2016, 208: 198-208.
[61] Tong Z M, Baldauf R W, Isakov V, Deshmukh P, Zhang K M. Roadside vegetation barrier designs to mitigate near-road air pollution impacts. Science of the Total Environment, 2016, 541: 920-927.
[62] Islam N, Rahman K S, Bahar M, Habib A, Ando K, Hattori N. Pollution attenuation by roadside greenbelt in and around urban areas. Urban Forestry & Urban Greening, 2012, 11(4): 460-464.
[63] 殷杉, 蔡静萍, 陈丽萍, 申哲民, 邹晓东, 吴旦, 王文华. 交通绿化带植物配置对空气颗粒物的净化效益. 生态学报, 2007, 27(11): 4590-4595.
[64] Neft I, Scungio M, Culver N, Singh S. Simulations of aerosol filtration by vegetation: validation of existing models with available lab data and application to near-roadway scenario. Aerosol Science and Technology, 2016, 50(9): 937-946.
[65] Yin S, Cai J P, Chen L P, Shen Z M, Zou X D, Wu D, Wang W H. Effects of vegetation status in urban green spaces on particle removal in a street canyon atmosphere. Acta Ecologica Sinica, 2007, 27(11): 4590-4595.
[66] Chen X P, Pei T T, Zhou Z X, Teng M J, He L, Luo M, Liu X X. Efficiency differences of roadside greenbelts with three configurations in removing coarse particles (PM_{10}): a street scale investigation in Wuhan, China. Urban Forestry & Urban Greening, 2015, 14(2): 354-360.
[67] 周姝雯, 唐荣莉, 张育新, 马克明. 街道峡谷绿化带设置对空气流场及污染分布的影响模拟研究. 生态学报, 2018, 38(17): 6348-6357.
[68] 武小钢, 蔺银鼎. 城市道路隔离带绿化模式对人行道空气质量的影响评价. 环境科学学报, 2015, 35(4): 984-990.
[69] Zheng T, Jia Y P, Zhang S J, Li X B, Wu Y, Wu C L, He H D, Peng Z R. Impacts of vegetation on particle concentrations in roadside environments. Environmental Pollution, 2021, 282: 117067.
[70] 马克明, 殷哲, 张育新. 绿地滞尘效应和机理评估进展. 生态学报, 2018, 38(12): 4482-4491.
[71] 李晓璐. 叶表面微结构对植物滞留颗粒物能力的影响研究[D]. 杭州: 浙江农林大学, 2021.
[72] Seyednasrollah B, Swenson J J, Domec J C, Clark J S. Leaf phenology paradox: why warming matters most where it is already warm. Remote Sensing of Environment, 2018, 209: 446-455.
[73] Eisenman T S, Churkina G, Jariwala S P, Kumar P, Lovasi G S, Pataki D E, Weinberger K R, Whitlow T H. Urban trees, air quality, and asthma: an interdisciplinary review. Landscape and Urban Planning, 2019, 187: 47-59.
[74] Viecco M, Vera S, Jorquera H, Bustamante W, Gironás J, Dobbs C, Leiva E. Potential of particle matter dry deposition on green roofs and living walls vegetation for mitigating urban atmospheric pollution in semiarid climates. Sustainability, 2018, 10(7): 2431.
[75] Weerakkody U, Dover J W, Mitchell P, Reiling K. Quantification of the traffic-generated particulate matter capture by plant species in a living wall and evaluation of the important leaf characteristics. Science of the Total Environment, 2018, 635: 1012-1024.
[76] Chen L X, Liu C M, Zhang L, Zou R, Zhang Z Q. Variation in tree species ability to capture and retain airborne fine particulate matter ($PM_{2.5}$). Scientific Reports, 2017, 7(1): 3206.
[77] 张维康. 北京市主要树种滞纳空气颗粒物功能研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2016.
[78] Leonard R J, McArthur C, Hochuli D F. Particulate matter deposition on roadside plants and the importance of leaf trait combinations. Urban Forestry & Urban Greening, 2016, 20: 249-253.

[79] Perini K, Ottelé M, Giulini S, Magliocco A, Roccotiello E. Quantification of fine dust deposition on different plant species in a vertical greening system. Ecological Engineering, 2017, 100: 268-276.
[80] Weerakkody U, Dover J W, Mitchell P, Reiling K. Evaluating the impact of individual leaf traits on atmospheric particulate matter accumulation using natural and synthetic leaves. Urban Forestry & Urban Greening, 2018, 30: 98-107.
[81] Kończak B, Cempa M, Pierzchała Ł, Deska M. Assessment of the ability of roadside vegetation to remove particulate matter from the urban air. Environmental Pollution, 2021, 268: 115465.
[82] 陈小平. 武汉城市干道绿化隔离带消减颗粒物效应及优化建议[D]. 武汉: 华中农业大学, 2017.
[83] 王书恒, 朱晓宇, 田如男, 文书生. 南京市 6 种常见园林植物滞尘效益的综合分析. 中国园林, 2021, 37(6): 111-116.
[84] Liang D, Ma C, Wang Y Q, Wang Y J, Zhao C X. Quantifying $PM_{2.5}$ capture capability of greening trees based on leaf factors analyzing. Environmental Science and Pollution Research, 2016, 23(21): 21176-21186.
[85] Zhang W K, Wang B, Niu X. Relationship between leaf surface characteristics and particle capturing capacities of different tree species in Beijing. Forests, 2017, 8(3): 92.
[86] Zhang W K, Zhang Z, Meng H, Zhang T. How does leaf surface micromorphology of different trees impact their ability to capture particulate matter? Forests, 2018, 9(11): 681.
[87] 李诗瑶, 牛玉斌, 樊瑾, 余海龙, 黄菊莹. 基于叶面微结构的火电厂周边绿化树种的滞尘能力分析. 生态学杂志, 2021, 40(2): 604-614.
[88] Nowak D J, Hirabayashi S, Bodine A, Greenfield E. Tree and forest effects on air quality and human health in the United States. Environmental Pollution, 2014, 193: 119-129.
[89] Maya-Manzano J M, Fernández-Rodríguez S, Monroy-Colín A, Silva-Palacios I, Tormo-Molina R, Gonzalo-Garijo Á. Allergenic pollen of ornamental plane trees in a Mediterranean environment and urban planning as a prevention tool. Urban Forestry & Urban Greening, 2017, 27: 352-362.
[90] Chameides W L, Lindsay R W, Richardson J, Kiang C S. The role of biogenic hydrocarbons in urban photochemical smog: atlanta as a case study. Science, 1988, 241(4872): 1473-1475.
[91] Ghirardo A, Xie J F, Zheng X H, Wang Y S, Grote R, Block K, Wildt J, Mentel T, Kiendler-Scharr A, Hallquist M, Butterbach-Bahl K, Schnitzler J P. Urban stress-induced biogenic VOC emissions and SOA-forming potentials in Beijing. Atmospheric Chemistry and Physics, 2016, 16(5): 2901-2920.
[92] Tiwary A, Williams I D, Heidrich O, Namdeo A, Bandaru V, Calfapietra C. Development of multi-functional streetscape green infrastructure using a performance index approach. Environmental Pollution, 2016, 208: 209-220.
[93] Burkhardt J, Pariyar S. Particulate pollutants are capable to 'degrade' epicuticular waxes and to decrease the drought tolerance of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.). Environmental Pollution, 2014, 184: 659-667.
[94] 芮丽燕. 城市街道交叉口的形态及绿化对通风的影响[D]. 南京: 南京大学, 2019.
[95] Miao C P, Yu S, Hu Y M, Bu R C, Qi L, He X Y, Chen W. How the morphology of urban street canyons affects suspended particulate matter concentration at the pedestrian level: an in-situ investigation. Sustainable Cities and Society, 2020, 55: 102042.
[96] Hu H B, Chen Q H, Qian Q R, Lin C H, Chen Y L, Tian W X. Impacts of traffic and street characteristics on the exposure of cycling commuters to $PM_{2.5}$ and PM_{10} in urban street environments. Building and Environment, 2021, 188: 107476.
[97] Tomson M, Kumar P, Barwise Y, Perez P, Forehead H, French K, Morawska L, Watts J F. Green infrastructure for air quality improvement in street canyons. Environment International, 2021, 146: 106288.
[98] 王佳, 吕春东, 牛利伟, 张芳菲. 道路植被结构对大气可吸入颗粒物扩散影响的模拟与验证. 农业工程学报, 2018, 34(20): 225-232.
[99] 赵彦博, 孙明阳. 严寒地区城市街谷底层可吸入颗粒物浓度分布. 科学技术与工程, 2020, 20(22): 9183-9189.
[100] 张进, 陈健. 高交通密度道路周边乔灌草型绿地对大气颗粒物的影响. 环境污染与防治, 2019, 41(9): 1094-1097.
[101] 战乃岩, 吕广, 李晓莉, 张帅. 灌木与乔木联合作用对街谷污染物分布影响. 环境科学与技术, 2020, 43(6): 101-107.
[102] 刘萌萌. 林带对阻滞吸附 $PM_{2.5}$等颗粒物的影响研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2014.
[103] Setälä H, Viippola V, Rantalainen A L, Pennanen A, Yli-Pelkonen V. Does urban vegetation mitigate air pollution in northern conditions? Environmental Pollution, 2013, 183: 104-112.
[104] Morakinyo T E, Lam Y F, Hao S. Evaluating the role of green infrastructures on near-road pollutant dispersion and removal: modelling and measurement. Journal of Environmental Management, 2016, 182: 595-605.
[105] Hashad K, Yang B, Baldauf R W, Deshmukh P, Isakov V, Zhang K M. Enhancing the local air quality benefits of roadside green infrastructure using low-cost, impermeable, solid structures (LISS). Science of the Total Environment, 2020, 717: 137136.