

DOI: 10.5846/stxb201304210761

王亚英,李萍,武小钢,阎海冰,王娟,李娇,蔺银鼎,郝兴宇.昼间气象条件对城市道路绿化带空气净化效果的影响——以太原市为例.生态学报, 2015, 35(4): 1267-1273.

Wang Y Y, Li P, Wu X G, Yan H B, Wang J, Li J, Lin Y D, Hao X Y. Effects of meteorological factors on air purification by green belts along urban roads in the daytime: a case study in Taiyuan. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(4): 1267-1273.

昼间气象条件对城市道路绿化带空气净化效果的影响 ——以太原市为例

王亚英^{1,2}, 李 萍¹, 武小钢¹, 阎海冰¹, 王 娟¹, 李 娇¹, 蔺银鼎^{1,*}, 郝兴宇¹

1 山西农业大学, 太谷 030801

2 山西省林业职业技术学院, 太原 030009

摘要:道路绿化带可以净化空气,改善道路环境,道路中的小气候条件会改变道路污染物扩散方式和速度,进而会影响到绿化带对污染物净化效果。气象条件对道路绿地对大气污染物净化效果影响的研究将有助于了解道路绿地的净化途径,为改善城市道路环境提供依据。对太原市 18 个道路绿地气象因子和 5 种主要污染物浓度进行了观测。结果表明:夏季,太原市城市道路内各气象要素之间存在一定的相关性,气温和地温正相关显著,空气相对湿度与地温及气温呈显著和极显著负相关。大部分情况下,有绿地非机动车道污染物平均浓度低于无绿地非机动车道对照点平均浓度,即道路绿地起到了对道路污染物的净化作用。道路绿地对污染物的净化百分率与气象因子存在显著的回归关系,并可以建立达到统计显著水平的回归方程,但不同污染物受不同的主导气象因子影响。气象条件会影响道路绿地对道路污染物的净化效果,今后的城市建设和道路绿地规划中应更多地考虑气象条件对绿地净化效果的影响。

关键词:城市道路绿化带;气象因子;污染物

Effects of meteorological factors on air purification by green belts along urban roads in the daytime: a case study in Taiyuan

WANG Yaying^{1,2}, LI Ping¹, WU Xiaogang¹, YAN Haibing¹, WANG Juan¹, LI Jiao¹, LIN Yinding^{1,*}, HAO Xingyu¹

1 Shanxi Agricultural University, Taigu 030801, China

2 Shanxi Forestry Vocational Technical College, Taiyuan 030009, China

Abstract: Green belts along roads can purify the air and improve the air quality along the roads. The microclimate conditions around a road will affect the manner and speed of pollutant diffusion, and it may affect how effective the green belt is in removing pollutants from the air. In this study, the effects of microclimate conditions on the removal of pollutants by green belts along roads were monitored, and the results will provide a basis for improving the road environment by improving our understanding of the manner in which the air around roads is purified by green belts. Microclimate conditions (wind speed, air temperature, relative humidity in the air, surface temperature, and air pressure) and the concentrations of five major pollutants, SO₂, NO_x, NH₃, total suspended particles (TSP) and respirable particulate matter (PM₁₀), were observed along 18 roads with green belts in the city of Taiyuan. The meteorological elements correlated with each other along the Taiyuan roads in the summer. There were significant positive correlations between the wind speed and the surface

基金项目:国家自然科学基金资助项目(30870434)

收稿日期:2013-04-21; 网络出版日期:2014-04-11

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: lyd_sxnd@sohu.com

temperature, and the air and surface temperatures also significantly positively correlated. However, the relative humidity, the surface temperature, and the air temperature were significantly negatively correlated. In most cases, the average pollutant concentration caused by non-motorized vehicles when a green belt was present was lower than the average pollutant concentration caused by non-motorized vehicles when a green belt was not present, so the green belt appeared to play a role in removing pollutants from the air around the road. The percentages of the concentrations of the five pollutants that were removed by the green belt had significant regression coefficients with the meteorological factors. Regression equations, and the statistical significances of the regressions, were established for the relationships between the pollutant removal percentages and the meteorological factors, but different pollutants were affected by different meteorological factors. The SO_2 removal percentage was mostly affected by the wind speed and air temperature, the percentage removed increasing with both meteorological conditions. The NO_x removal percentage was mainly affected by, and increased with, the ground temperature. The NH_3 removal percentage was mainly influenced by, and increased with, the air temperature. The TSP removal percentage was mainly affected by, and increased with, the air humidity. The PM_{10} removal percentage was mainly affected by, and increased with, the air temperature and air pressure. Green space regulates, to a certain extent, the surrounding microclimate, and can cause the air temperature to decrease and the air humidity to increase in the summer. A decrease in air temperature around the road will decrease the rate of vertical diffusion of NO_x , NH_3 , and PM_{10} , but an increase in air humidity will promote a decrease in TSP concentrations around the road. In future 'green' road designs, an appropriate increase in the road green belt area will be beneficial in both improving the road microclimate environment and in decreasing the concentrations of solid contaminants (TSP) in the air. However, it will probably not be effective in improving the diffusion of NO_x , NH_3 , and PM_{10} . Weather conditions will affect the pollutant removal percentages achieved by green belts along roads, so more meteorological studies need to be conducted along road green belts to provide the information needed to improve our ability to achieve pollutant removal using green belts along roads in urban areas, and to improve road construction planning.

Key Words: city road green belt; meteorological factors; pollutant

近年来随着我国城市化的不断加快,城市人口不断增加,我国大中型城市机动车保有量增长快速,给我国经济带来了繁荣,同时车流产生的污染也持续攀升^[1-2]。这些污染物会影响城市环境,对活动于城市道路中的行人及非机动车司机产生危害。为减少道路污染对城市居民尤其是道路行人的生态危害,国内外学者对道路污染进行了多角度的研究和探索,包括不同街道结构对污染物扩散的研究和不同道路绿化带对污染物扩散的研究^[1,3-8]。道路绿地不仅能美化城市环境,而且绿色植物可以通过吸收有害气体、吸滞粉尘、隔音降噪改善道路环境降低污染。道路绿化面积、植物种类、种植密度及绿化模式都会影响道路绿地的污染物净化效果。不同结构道路绿化带会改变道路微气象条件,影响非机动车道污染物浓度^[9-10]。有研究表明:气象条件是影响空气质量的客观因素,有利的地面天气形势会改善城市的大气环境,即大的天气形势会影响城市的空气质量,国内对局地小气候对城市道路污染的影响的研究还很少^[11-13],而局地小气候条件对城市道路绿化带的净化效果影响的研究也少有报道^[14-16]。局地气象条件的变化是否会影响道路绿化带对各种污染物的净化效果?本文将就这一问题进行探讨,为将来的城市道路绿化及城市道路环境预测提供依据。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

太原市是山西省的省会城市,东经 $111^{\circ}30'$ — $113^{\circ}09'$,北纬 $37^{\circ}27'$ — $38^{\circ}25'$ 。太原市属大陆性暖温带季风气候,年平均风速为 1.8 — 2.4 m/s,年平均降雨量 456 mm,年平均气温 9.5 $^{\circ}\text{C}$ 。1 月份最冷,平均气温 6.8 $^{\circ}\text{C}$; 7 月份最热,平均气温 23.5 $^{\circ}\text{C}$ 。

1.2 实验方案设计

1.2.1 监测项目、仪器和方法

2009 年 7—8 月份,在太原市选择 18 个城市道路绿地(绿带配置结构为乔灌草或乔灌),在无风或者微风(风速小于 4 m/s)情况下进行观测,使用两套(6 台)观测仪器同时观测,用时 20 d(期间遇雨天和大风天不进行观测)。选择 SO₂、NO_x、NH₃、TSP 和 PM₁₀ 等 5 种主要城市污染物作为净化目标进行研究。

测试仪器:气象要素(风速、空气温度、空气相对湿度、气压)采用美国产手持气象站 Kestrel3500(风速观测精确度±3%,空气相对湿度观测精确度±3%,大气压力观测精度±3 hPa),地面温度采用普通玻璃温度表(测精确度±0.2),空气温度采用大气采样仪自带的温度计测定(观测精度±0.2)。污染物采样仪器为青岛崂山电子仪器厂生产的 KB6120 型中流量大气采样仪。气象要素测定高度为距离地表面 1.5 m。

气象要素观测方法:每 20 min 观察 1 次,风速为 2 min 平均风速。每次试验观察 4 次,取 4 次的平均值。

污染物监测方法:低空污染物浓度值的测量高度为 1.5 m,采样流量 100 L/min。固体项目,TSP、PM₁₀ 每次采样时间为 60 min;气体项目,NO_x 采样时间 60 min、SO₂ 采样时间 60 min、NH₃ 采样时间 20 min。NO_x 吸收量的测定采用盐酸萘乙二胺比色法(GB/T15436—1995),SO₂ 吸收量的测定采用甲醛缓冲溶液吸收—盐酸副玫瑰苯胺分光光度法(GB/T15262—1994),NH₃ 吸收量的测定采用次氯酸钠水杨酸分光光度法(GB/T14679—1993),TSP 的测定采用重量法(GB/T15432—1995),PM₁₀ 的测定采用重量法(GB/T6921—1986)。

样品采集时间:通过对昼间车流量情况的调查,选取昼间车流量基本稳定的时间段进行试验。1 日分 3 个时段,即 9:00—10:00、11:00—12:00、13:30—14:30。

不同结构绿带污染物净化百分率计算公式^[3]:

$$P_n = ((C_e - C_r) - (C_e - C_0)) / C_e \times 100\%$$

式中, P_n 是绿带对各种污染物净化百分率; C_e 是机动车道靠近绿带一侧污染物浓度; C_r 是非机动车道靠近绿带一侧污染物浓度; C_0 无绿带非机动车道污染物浓度(对照浓度)。

1.2.2 绿化带概况及监测点的布置

在太原市 13 条主要道路中选择绿化隔离带空间结构和植物配置基本一致的 18 块城市道路绿地,设置了 18 个监测点。各监测点绿化隔离带空间格局及道路状况见表 1。其中乔木以多年生槐树为主,树龄 15—20a,株高 15 m 左右,冠径 6 m 左右,树冠丰满度和生长势基本一致,株距 5 m。灌木以整形胶东卫矛或紫叶小檗为主,高度 0.6 m 左右;草本以禾本科冷季型修剪草坪为主。

表 1 样地绿化隔离带空间结构特征

Table 1 Space structure characteristic of the test sample

样本编号 Scale number	绿化带宽度/m Greenbelt wide	街道宽度/m Road wide	配置模式 Arrangement model	样本编号 Scale number	绿化带宽度/m Greenbelt wide	街道宽度/m Road wide	配置模式 Arrangement model
1	6	74	乔+灌+草	10	3.9	80	乔+灌+草
2	3.5	74	乔+灌+草	11	3	50	乔+灌
3	10	74	乔+灌+草	12	2.5	50	乔+灌
4	6	74	乔+灌+草	13	1.8	40	乔+灌
5	10	42	乔+灌+草	14	5	22	乔+灌
6	4.5	74	乔+灌+草	15	2	30	乔+灌
7	3.9	21	乔+灌	16	2	36	乔+灌
8	4.5	21	乔+灌	17	3	50	乔+灌
9	3.9	80	乔+灌+草	18	4.5	56	乔+灌

每个道路绿化带均设置 3 个测点(图 1),其中 A 点放置于机动车道距离绿带 1 m 处,B 点放置于非机动车道远离绿带一侧距离人行道 1 m 处,分别处于绿化带两侧,各监测点与绿化带间隔端口的距离应大于 5 m,

C 点作为无绿地的对照测点。

1.3 数据处理与分析

运用 Excle2003 软件进行图表处理,用统计软件 SAS 8.0 进行气象因子的相关性分析。利用统计软件 SAS 8.0 对气象条件与道路绿地净化百分率进行逐步回归,筛选出于与道路绿地净化百分率相关的气象因子,建立回归模型。

2 结果与分析

2.1 各观测时刻气象条件的变化情况

分别对太原市 18 个道路绿地的气象观测表明(表 2),从 9:00—10:00 到 13:30—14:30,道路平均风速、气温和地表面温度呈增加的趋势,而空气相对湿度逐渐下降,大气压变化很小。各气象要素间的相关分析表明(表 3),气温和地温正相关显著,因为气温的变化主要是受地温的影响,空气的热量主要来源于地表面,地温增加后对空气产生加热作用而使气温相应升高^[17]。空气相对湿度与气温及地温呈显著和极显著负相关,因为地温升高会使气温升高,而气温升高会使空气的饱和水汽压升高,即空气容纳水汽的能力增加,在地面没有足够水汽补充的情况下,空气的相对湿度(空气饱和程度)下降^[17]。

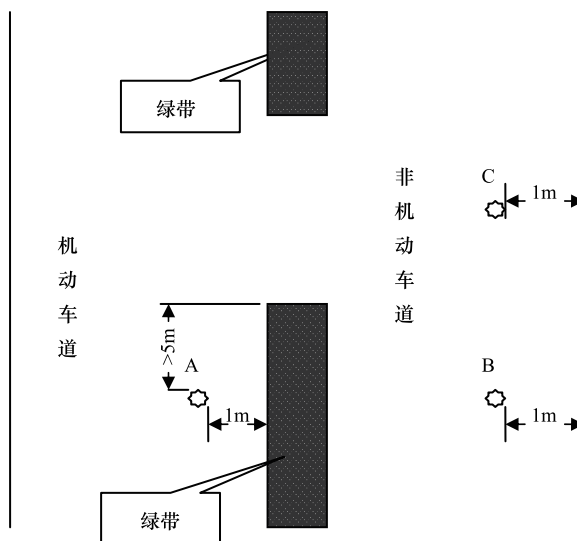


图 1 绿化带测量点示意图

Fig.1 The simulation schematic of green belts

A、B 两点纵线对应; C 点放置在绿化带间隔中心与 B 点平行的位置 (C 点对应的道路两侧无绿地)

表 2 气象条件变化表

Table 2 The change of meteorological factors

时间 Time	风/(m/s) Wind speed	气温/℃ Air temperature	空气湿度/% Air humidity	地温/℃ Ground temperature	气压/hPa Air pressure
9:00—10:00	0.50±0.04	22.8±0.70	58±2.41	24.2±1.29	934.1±0.72
11:00—12:00	0.60±0.06	24.4±0.67	52±1.93	27.1±1.07	934.1±0.72
13:30—14:30	0.68±0.06	26.9±0.76	47±1.60	31.2±1.54	934.4±0.78

表 3 气象因子间的相关分析

Table 3 The correlation analysis of different meteorological factors

气象因子 Meteorological factors	气温 Air temperature	空气湿度 Air humidity	地温 Ground temperature	气压 Air pressure
风 Wind speed	0.0666	-0.1092	0.1878	0.0182
气温 Air temperature		-0.6061 **	0.8308 **	-0.2336
湿度空气 Air humidity			-0.3391 *	0.0824
地温 Ground temperature				-0.0322

* 表示显著 ($P < 0.05$), ** 表示极显著 ($P < 0.01$)

2.2 道路各观测点污染物浓度的变化

在 13:30—14:30 时段,各观测点 5 种污染物平均浓度较 9:00—10:00 和 11:00—12:00 有下降趋势(图 2)。除 9:00—10:00 时段有绿地非机动车道(B 点) NO_x 、 NH_3 的平均浓度高于无绿地非机动车道对照点(C 点)浓度外,其他污染物及其他时刻均为有绿地非机动车道(B 点) 污染物平均浓度低于无绿地非机动车道对照点(C 点)浓度,即绿地总体上起到了对道路污染物的净化作用。在 11:00—12:00 和 13:30—14:30, B 点 SO_2 平均浓度降幅较 9:00—10:00 大,13:30—14:30 时段道路绿地对 SO_2 的平均净化百分率最大(6.15%)(图

3)。NO_x 和 NH₃ 平均浓度在 9:00—10:00 时段 B 点较 C 点低(图 2),所以该时刻这两种污染物的绿地平均净化百分率均为负值。在 11:00—12:00 和 13:30—14:30,绿地对 NO_x 的平均净化百分率分别是 4.15% 和 16.60%,而绿地对 NH₃ 的平均净化百分率分别是 5.80% 和 9.80%,均为 13:30—14:30 时段净化效果好(图 3)。TSP 绿地平均净化百分率 9:00—10:00 时段最大(12.64%),13:30—14:30 时刻最小(2.42%)。而绿地对 PM₁₀ 的平均净化百分率为 13:30—14:30 时段最大(10.04%)。除 TSP 外,道路绿地对其他 4 种污染物的平均净化百分率均为 13:30—14:30 时段较大,9:00—10:00 较小(图 3)。

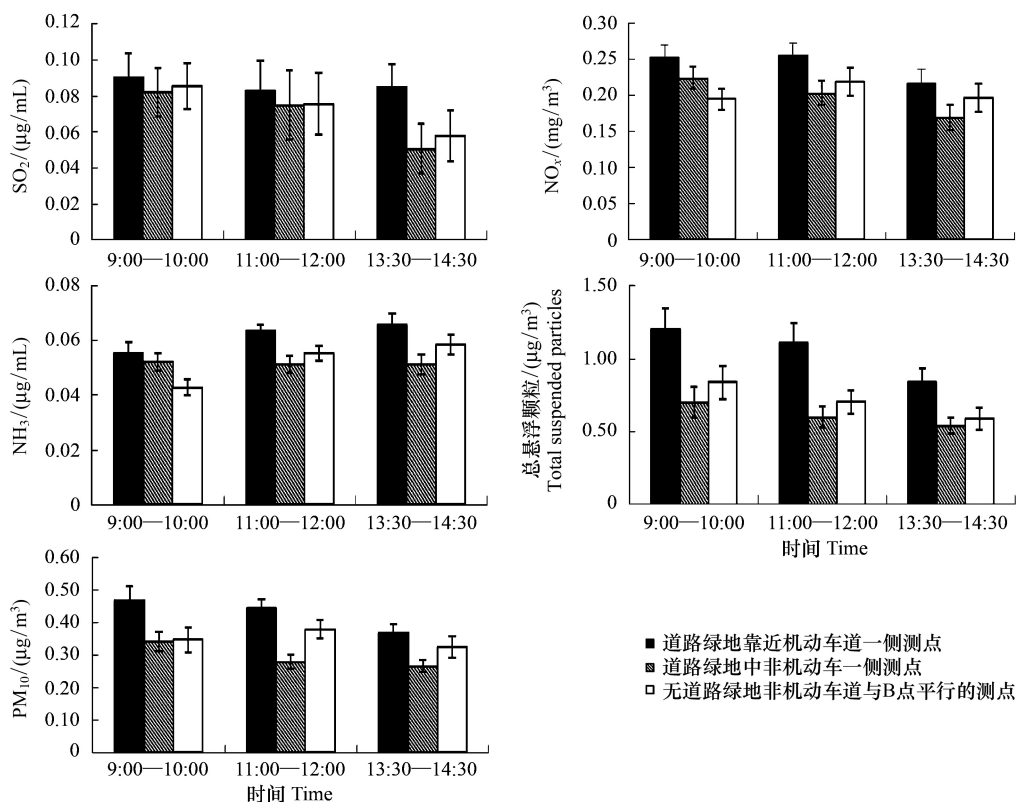


图 2 不同时段道路污染物浓度变化

Fig.2 The change of road pollutant concentrations at different time

A:道路绿地靠近机动车道一侧测点;B:道路绿地中非机动车一侧测点;C:无道路绿地非机动车道与B点平行的测点

2.3 气象条件对道路绿地净化百分率的影响

道路绿地对 5 种污染物的净化百分率与气象条件的逐步回归分析表明(表 4):道路绿地对污染物的净化百分率与气象条件存在显著的回归关系,并可以建立达到统计显著水平的回归方程,但不同污染物受不同的主导气象因子影响。SO₂ 主要受风速和气温的影响,并随风速和气温的增加净化百分率增加。而 NO_x 主要受地表面温度的影响,随地表面温度的增加净化百分率增加。NH₃ 主要受气温的影响,并随气温的增加净化百分率增加。TSP 主要受空气湿度的影响,随空气相对湿度增加净化百分率增加。PM₁₀ 主要受气温和气压的影响,随气温和气压的增加净化百分率增加。

3 结论

(1)夏季,从 9:00—10:00 到 13:30—14:30,太原市道路平均风速、气温和地表面温度呈增加的趋势,而

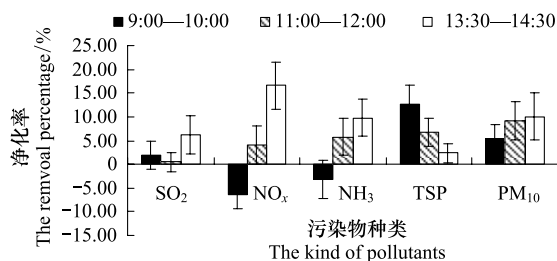


图 3 净化百分率变化

Fig.3 The change of removal percentage

空气相对湿度逐渐下降,大气压几乎没有变化。各气象要素之间存在一定的相关性,气温和地温正相关显著,空气相对湿度与气温及地温呈显著和极显著负相关。

表 4 城市道路绿地污染物净化百分率与气象条件的关系

Table 4 The relation of removal percentage to pollutants and meteorological factors in city green road

污染物种类 The kind of pollutants	模型 Mathematical model	$P_r > F$	气象因子 Meteorological factors	$P_r > t $
SO ₂	$y = 0.2684x_1 + 0.0132x_2 - 0.4298$	0.008	x_1	0.0109
			x_2	0.0867
NO _x	$y = 0.0096x_4 - 0.2526$	0.0362	x_4	0.0362
NH ₃	$y = 0.0274x_2 - 0.6399$	0.0023	x_2	0.0023
总悬浮颗粒物 Total suspended particles, TSP	$y = 0.00492x_3 - 0.20264$	0.044	x_3	0.044
PM ₁₀	$y = 0.01396x_2 + 0.02445x_5 - 23.0797$	0.0354	x_2	0.128
			x_5	0.0176

x_1 : 风速; x_2 : 气温; x_3 : 空气相对湿度; x_4 : 地面温度; x_5 : 气压

(2) 除 9:00—10:00 时刻(气温较低,空气相对湿度较高)有绿地非机动车道(B 点) NO_x、NH₃ 的平均浓度高于无绿地非机动车道对照点(C 点)浓度外,其他污染物及其他时刻均为有绿地非机动车道(B 点) 污染物平均浓度低于无绿地非机动车道对照点(C 点)浓度,即绿地总体上起到了对道路污染物的净化作用。除 TSP 外,道路绿地对其他 4 种污染物的平均净化百分率均为 13:30—14:30 时刻较大,9:00—10:00 较小。

(3) 道路绿地对污染物的净化百分率与气象条件存在显著的回归关系,并可以建立达到统计显著水平的回归方程,但不同污染物受不同的主导气象因子影响。气象条件会影响道路绿地对道路污染物的净化效果,今后的城市建设和道路绿地规划中应更多地考虑气象条件对绿地净化效果的影响。

4 讨论

污染物从污染源排放到大气中的扩散过程及其危害程度,主要决定于气象因素,此外还与污染物的特征和排放特性,以及排放区的地形地貌状况有关。在污染源排放量变化不大的情况下,气压、温度、风向风速、降水、湿度等气象条件会影响空气质量^[18]。气象条件的变化会改变了污染物扩散方式和速度,道路绿地对污染物的净化效果也应该会随气象条件的变化发生改变。如气温和地温的变化主要会影响空气的垂直运动^[17],也就是会影响污染物的垂直扩散速度,温度越高污染物的垂直扩散速度越快^[18]。而风速的变化主要会影响空气的水平运动,有利于污染物的水平扩散^[18]。风能扩大绿地的生态效应的范围,促进大气污染物的清除^[19]。温度和风的变化会影响污染物的扩散方式和速度,扩散方式和速度变化后道路绿地对污染物的吸收和吸滞方式也会发生变化,进而影响其对道路污染物的净化效果。道路绿地对各种污染物净化百分率与气象要素之间建立了达到显著水平的回归方程,表明气象条件的变化的确会影响道路绿地的净化效果。

不同的污染物物理和化学性质不同,不同的气象因子对其影响存在差异,不同的污染物所受的主导气象因子会有所不同,但其中原因有待于今后的研究进行更深入的探讨。另外,气象因素之间也存在一定的相关性,不同的气象因素的变化是受同一气象因子决定的,如气温和地温是显著相关的,而气温和地温与空气相对湿度又都负相关显著(表 2),实际上空气温度和空气相对湿度受地面温度影响很大,地面温度升高气温相应升高而空气相对湿度会随之下降。也就是说,虽然 NO_x 的净化百分率主要受地温影响,NH₃ 的净化百分率主要受气温影响,由于气温、地温存在相关性我们可以认为道路绿地对这两个污染物的净化百分率是主要受同一个气象要素影响的。绿地对周边小气候有一定的调节作用,在夏季可以起到降温增湿的作用^[20-22],道路环境温度下降不利于 NO_x 和 NH₃ 及 PM₁₀ 的垂直扩散,但空气湿度的升高会有利于 TSP 浓度的下降(表 4)。在今后的道路绿地设计中,适当增加道路绿带面积不仅有利于改善道路小气候环境,还有利于降低空气中固态污染物 TSP 的浓度,但可能不利于 NO_x 和 NH₃ 及 PM₁₀ 的扩散。

参考文献(References):

- [1] 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): 4590-4596.
- [2] 刘德鸿, 王发园, 周文利, 杨玉建. 洛阳市不同功能区道路灰尘重金属污染及潜在生态风险. 环境科学, 2012, 33(1): 69-70.
- [3] 刘晓华, 黄石德, 潘辉, 高元竞. 城市绿化树种对道路空间大气颗粒物浓度的影响. 福建林学院学报, 2009, 29(1): 79-83.
- [4] 吴志军, 黄震, 谢拯, 王嘉松, 周校平. 城市街道峡谷机动车污染物扩散的模拟研究. 吉林大学学报(工学版), 2002, 32(2): 28-32.
- [5] Johnson W B, Ludwig F L, Dabberdt W F, Allen R J. An urban diffusion simulation model for carbon monoxide. Journal of the Air Pollution Control Association, 1973, 23(6): 490-498.
- [6] Lee I Y, Park H M. Parameterization of the pollutant transport and dispersion in urban street canyons. Atmospheric Environment, 1994, 28(14): 2343-2349.
- [7] 吕萍, 袁九毅, 张文煜. 城市街谷几何结构对街谷内流场及污染物浓度场影响的数值模拟. 高原气象, 2004, 23(4): 534-539.
- [8] 王嘉松, 黄震. 城市街区大气流动与汽车尾气扩散的三维数值模拟. 上海环境科学, 2003, 22(4): 227-233.
- [9] 沈家芬, 苏开君, 冯建军. 道路绿化种植抗污染植物模式研究. 城市环境与城市生态, 2001, 14(6): 52-53.
- [10] 李萍, 王松, 王亚英, 郝兴宇, 武小钢, 阎海宾, 蔺银鼎. 城市道路绿化带“微峡谷效应”及其对非机动车道污染物浓度的影响. 生态学报, 2011, 31(10): 2888-2897.
- [11] 陈添. 气象条件对北京市空气质量的影响. 环境保护, 2006(05B): 46-49.
- [12] 王宏, 林长城, 隋平, 陈彬彬. 福州天气形势分型与大气污染物相关分析. 气象与环境学报, 2008, 24(6): 7-11.
- [13] 田健丽, 蒋再洁, 李洁. 气象条件对机动车排放污染物扩散的影响. 中国环境科学学会学术年会优秀论文集, 2006, 3380-3384.
- [14] Khan F I, Abbasi S A. Effective design of greenbelts using mathematical models. Journal of Hazardous Materials, 2001, 81(1/2): 33-65.
- [15] Khan F I, Abbasi S A. Attenuation of gaseous pollutants by greenbelts. Environmental Monitoring and Assessment, 2000, 64(2): 457-475.
- [16] Shannigrahi A S, Sharma R, Fukushima T. Air pollution control by optimal green belt development around the Victoria memorial monument, KOLKATA(INDIA). International Journal of Environmental Studies, 2003, 60(3): 241-249.
- [17] 刘江, 徐秀娟. 气象学(北方本). 北京: 中国农业出版社, 2002: 57-85.
- [18] 曹文骏. 空气污染气象学. 北京: 气象出版社, 2004: 11-30.
- [19] 冯娴慧. 城市绿地与风的环境效应研究. 中国园林, 2010, 26(2): 82-85.
- [20] 朱春阳, 李树华, 纪鹏, 任斌斌, 李晓艳. 城市带状绿地宽度与温湿效益的关系. 生态学报, 2011, 31(2): 0383-0394.
- [21] 蔺银鼎, 韩学孟, 武小钢, 郝兴宇, 王娟, 梁峰, 梁娟, 王志红. 城市绿地空间结构对绿地生态场的影响. 生态学报, 2006, 26(10): 3399-3346.
- [22] 郝兴宇, 蔺银鼎, 武小钢, 王娟, 梁峰, 梁娟. 城市不同绿地垂直热力效应比较. 生态学报, 2007, 27(2): 685-692.