

城市园林对大气颗粒物的消减与大气中二氧化硫和氮氧化物的浓度变化

刘佩琪, 邓志华, 陈奇伯*

(西南林业大学 环境科学与工程学院, 云南 昆明 650224)

摘要:研究了昆明市城市园林对大气颗粒物的消减量和大气中二氧化硫和氮氧化物浓度的年内动态变化及其两者之间相关性。结果表明,昆明市大气中二氧化硫和氮氧化物的浓度随季节有明显的变化,氮氧化物、二氧化硫的含量变化范围分别为 $0.149\sim0.175\text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 与 $0.226\sim0.252\text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$,含量高低顺序均为:春季>冬季>秋季>夏季。植被对大气颗粒物的消减量的高低顺序为:春季>冬季>秋季>夏季,与二氧化硫和氮氧化物浓度变化一致。大气颗粒物对有毒有害气体具有一定的吸附性,植被对大气颗粒物的消减量与二氧化硫和氮氧化物的浓度具有负相关性,其中二氧化硫和氮氧化物的浓度与PM₁₀极显著负相关,通过3次曲线模型对两者之间的关系进行拟合表明,植被对大气颗粒物的滞留作用间接减少了大气中二氧化硫和氮氧化物的含量,可为地方和区域环境监测评价提供参考。

关键词:城市园林; 大气污染; 大气颗粒物; 二氧化硫; 氮氧化物

中图分类号:S718.45 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-7461(2016)06-0013-06

Reduction of Atmospheric Particulate and the Concentration Change of Sulfur Dioxide and Nitrogen Oxides by Urban Forests

LIU Pei-qi, DENG Zhi-hua, CHEN Qi-bo*

(School of Environmental Science and Engineering, Southwest Forestry University, Kunming, Yunnan 650224, China)

Abstract: Effects of urban forests in Kunming were studied on the reduction of atmospheric particulates and concentration changes of sulfur dioxide and nitrogen oxides, as well as their seasonal changes. Significant dynamic variations were observed on atmospheric SO₂ and NO_x. The variation ranges of SO₂ and NO_x were $0.149\sim0.175\text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ and $0.226\sim0.252\text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$, respectively. The seasonal changes were in the order of spring>winter>autumn>summer. The amount of atmospheric particulate reduction in four seasons followed the order of spring>winter>autumn>summer, which was in consistent with the seasonal changes of SO₂ and NO_x. Atmospheric particulates could adsorb toxic or harmful gases. The reduction of atmospheric particulates significantly and negatively correlated with SO₂ and NO_x concentrations, in which the correlation between SO₂ and NO_x concentrations and PM₁₀ was most significantly negative. The results of the simulation with cubic curve indicated that the reduction of atmospheric particulates by urban forests indirectly reduced atmospheric SO₂ and NO_x. The results could provide a reference for local and regional environmental monitoring and evaluation.

Key words: urban forest; atmospheric pollution; atmospheric particulate; sulfur dioxide; nitrogen oxides

收稿日期:2016-01-20 修回日期:2016-03-06

基金项目:国家林业局林业公益性行业科研专项(201204101—10);云南省高校优势特色重点学科(生态学)建设项目(05000511311);西南林业大学科技创新基金(C15116)。

作者简介:刘佩琪,女,在读硕士,研究方向:恢复生态。E-mail: zaizailpq@163.com

*通信作者:陈奇伯,男,博士,教授,研究方向:水土保持和恢复生态。E-mail: chenqb05@163.com

随着工业的快速发展和城市建设的扩大,工业废弃物、建筑扬尘和汽车尾气排放量急剧上升,城市大气污染是当前人类面临的日益严重和亟待解决的环境危机之一。大气中的二氧化硫和氮氧化物与粉尘共存,可生成毒性更大的硝酸或硝酸盐气溶胶,形成酸雨^[1-2]。一般按颗粒污染物的空气动力学等效粒径将粉尘颗粒物分为总悬浮颗粒物 TSP(10.0~100.0 μm)、粗颗粒物 PM₁₀(2.5~10.0 μm)、细颗粒物 PM_{2.5}(0.1~2.5 μm)和超细颗粒物 PM_{0.1}(≤0.1 μm)4 种类型^[3],大气颗粒物主要来自于化石燃料、矿石冶炼、机动车等污染源的直接排放和 SO₂、NO_x、NH₃、VOC_s 等污染物的间接转化^[4],不同粒径的颗粒物主要组成成分也有所差异,如 PM_{2.5} 一般含有 SO₄⁻²、NH₄⁺、NO₃⁻ 等盐类,多环芳烃(PAHs)、藿烷、甾烷、金属元素、微量元素、无机碳和有机碳等物质^[5-8]。城市园林是城市生态环境的重要组成部分,对于一定浓度范围内的大气污染物,不仅有一定的抵抗能力,而且有相当程度的吸收净化能力^[9],所以除了减少污染源和排放量以外,利用城市园林植物对大气颗粒物的滞留作用也是降低大气颗粒物污染的一种有效手段^[10-12]。大气颗粒物由于其表面结构复杂,通常富集有多种有毒物质,如二氧化硫和氮氧化物,而植物叶片通过吸附大气颗粒物间接吸附了这些物质^[13],所以有效控制大气颗粒物浓度,也会相应的减少大气中二氧化硫和氮氧化物的浓度。

目前,国内外的学者主要研究在野外清洁区和

污染区的城市园林植物吸收净化大气 SO₂ 和氮氧化物,通过分析测定园林植物叶片 S、N 含量来评价园林植物吸收净化大气 SO₂ 和氮氧化物的效果^[9,14-17],也对植物叶片吸附大气颗粒物的机理,树种间的差异以及改善城市环境等方面做了大量研究^[18-19]。但是鲜有对于植被消减大气颗粒物间接降低了大气中二氧化硫和氮氧化物浓度的研究。本研究以昆明为例,选择当地常见的常绿树种,分析植物叶片对大气颗粒物的消减作用,大气中二氧化硫和氮氧化物的浓度变化,探讨两者之间的相互关系,为通过研究植物的降尘作用来监测大气污染物的浓度变化提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

昆明(102°10'—103°40'E, 24°23'—26°22'N),中国西南云贵高原中部,南濒滇池,三面环山,滇池平原。境内属北亚热带低纬高原山地季风气候,年平均气温 16.5°C, 年均降雨量 1 450 mm, 无霜期 278 d。采样区位于海拔 2 060~2 200 m 的昆明市东三环环城路的边坡,此处车流量大且集中,大气污染物主要来源于汽车尾气的排放以及周边城市建设施工所产生的粉尘,该地城市园林为人工林,分布最广泛和最典型的蓝桉(*Eucalyptus globulus*)、云南松(*Pinus yunnanensis*)、华山松(*Pinus armandii*)、圆柏(*Sabina chinensis*)为对象(表 1)。

表 1 典型园林树木的生长状况

Table 1 Typical landscape plants and trees' growth

树种	胸径 /cm	高度 /m	林龄 /a	郁闭度 /%	林分密度 (株·hm ⁻²)
蓝桉(<i>Eucalyptus globulus</i>)	35.20~35.75	27.15~28.34	26	0.90	1 123
云南松(<i>Pinus yunnanensis</i>)	25.63~26.11	25.85~26.04	25	0.75	1 330
华山松(<i>Pinus armandii</i>)	24.55~24.74	24.20~26.40	25	0.73	1 340
圆柏(<i>Sabina chinensis</i>)	18.60~19.23	19.70~20.10	20	0.60	1 520

1.2 采样方法

2014 年 12 月、2015 年 3 月、2015 年 7 月、2015 年 10 月采样。选择晴朗无风或者微风的天气进入采样区进行短时间采样,大气采样点共布设有 10 个,因 4 种林分面积大小相差微小,所以桉树林、云南松林、华山松林和圆柏林各 2 个点,马路上的空旷地区 2 个点,使用 TMP-1500 手持式大气采样器(深圳市万仪科技有限公司)对大气中的二氧化硫和氮氧化物采样,用 TH-β10/TH-10 大气颗粒物浓度仪(北京卓川电子科技有限公司)对空旷地区以及林内大气中 TSP 和 PM₁₀ 的浓度进行测定并记录读数,空旷地区的 PM_{2.5} 的浓度也有大气颗粒物浓度仪

定,对每个采样点的 4 种植被的当年生树叶进行采集并带回实验室进行叶片上所附着 PM_{2.5} 的测定。

1.3 测定方法

大气中 SO₂ 的测定方法采用的是国际标准组织(ISO)认定的四氯汞钾溶液吸收-盐酸副玫瑰苯胺分光光度法(GB 3095-2012)。大气中氮氧化物的测定方法采用的是国际标准组织(ISO)认定的盐酸奈乙二胺分光光度法(GB 3095-2012)。大气颗粒物中的 TSP、PM₁₀ 以及空旷地区 PM_{2.5} 的浓度可由仪器 TH-β10/TH-10 直接测定得到,叶片上附着的 PM_{2.5} 测定方法:每种植物取适量叶片,用软毛刷在烧杯中以适量蒸馏水洗脱叶表面颗粒物,将所得浸

洗液用已知质量的 $2.5\text{ }\mu\text{m}$ 孔径滤膜(北京海诚世洁过滤器材有限公司)过滤,并烘干称重,求得滤膜过滤前后质量之差即为PM_{2.5}质量,每种植物测定3组重复样本取平均值。

1.4 数据处理

利用Excel软件进行数据的分类汇总,利用SPSS 21.0软件进行一元线性回归分析和曲线估计分析。

2 结果与分析

2.1 林内外大气中二氧化硫和氮氧化物浓度的季节动态

通过4个季节林内外大气中二氧化硫和氮氧化物浓度采样数据的处理(图1)。林外,二氧化硫的浓度冬季最高,夏季最低;氮氧化物的浓度春季最高,夏季最低。林内,二氧化硫的浓度春季最高,秋季最低;氮氧化物的浓度春季最高,夏季最低。春夏秋冬,林内外二氧化硫的浓度差值依次为0.1950、0.2124、0.2144、0.2021 mg·m⁻³;氮氧化物的浓

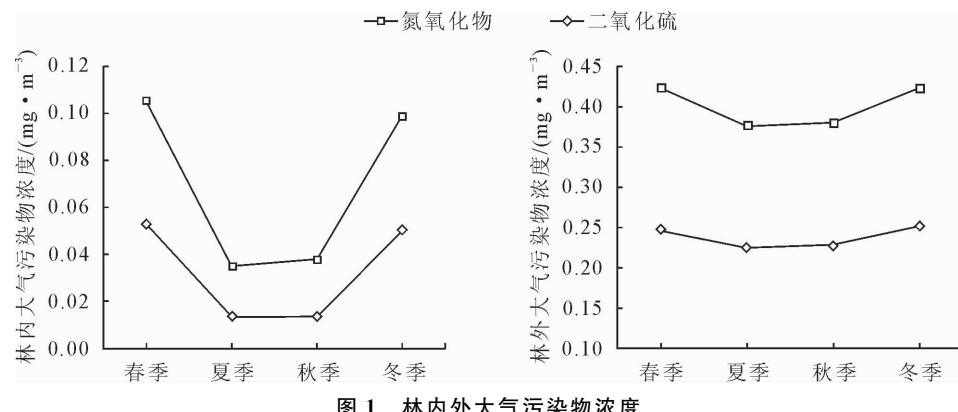


图1 林内外大气污染物浓度

Fig. 1 Atmospheric pollutant concentrations in and out of the forests

表2 林内外大气颗粒物浓度

Table 2 Atmospheric particulate matter concentrations in and out of the forests

大气颗粒物浓度值 /(\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3})	林内				林外			
	春季	夏季	秋季	冬季	春季	夏季	秋季	冬季
TSP	84.75	60.25	65.25	88.75	280	115	186	225
PM ₁₀	64.75	32.50	40.75	71.50	125	64	75	114
PM _{2.5}	29.25	14.75	18.50	35.25	68	35	47	63

2.2 植被所消减的大气颗粒物浓度与二氧化硫和氮氧化物浓度变化的关系

为确定植被消减大气颗粒物对林内二氧化硫和氮氧化物的潜在影响,测定植被所消减的3种大气颗粒物的浓度与二氧化硫和氮氧化物的浓度,对二者进行相关性分析(表3)。二者之间具有一定的负相关关系,植被消减掉的TSP和PM₁₀浓度与大气中二氧化硫和氮氧化物浓度极显著负相关($P <$

0.01),消减的PM_{2.5}浓度与大气中二氧化硫和氮氧化物浓度显著负相关($P < 0.05$)。因此,植被消减大气颗粒物浓度的越大,大气中二氧化硫和氮氧化物浓度就越低。其中减少PM₁₀的含量对二氧化硫和氮氧化物的影响最大,PM_{2.5}的粒径较小,其吸附能力不如粒径大的颗粒物,所以对二氧化硫和氮氧化物浓度产生变化的能力比TSP和PM₁₀的小。

与GB 3095-2012《环境空气质量标准》作比较可得出,春季和冬季二氧化硫的浓度达到了国家二级标准,夏季和秋季则达到了国家一级标准,春季和冬季二氧化硫的浓度是夏季和秋季的3倍,说明植物在夏季和秋季对二氧化硫的吸收效果更好,林内空气很清洁,春夏秋冬四季林内氮氧化物的浓度均在一级标准以上,说明该地区氮氧化物的污染程度不高,植被对其的净化效果无明显的季节差异。

对林内外四季大气颗粒物的测定数据如表2所示,通过对表2中数据进行差值处理为春夏秋冬4个季节植被所消减的大气颗粒物浓度(图2)表明,春季植被对大气颗粒物的消减作用最强,达到最大值,同一季节中植被对TSP的消减作用均强于PM₁₀和PM_{2.5},夏季植被对3种颗粒物的消减能力差异不明显,而春秋冬季,3种颗粒物的消减量差异明显,尤其是TSP的消减量分别是PM₁₀和PM_{2.5}的3倍多。

为了进一步确定植被对大气颗粒物消减浓度与

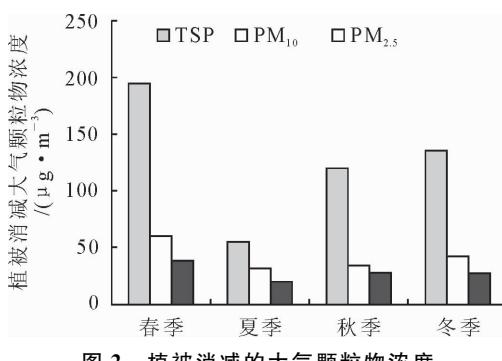


图 2 植被消减的大气颗粒物浓度

Fig. 2 The reduction of atmospheric particulate matter by vegetation

表 3 大气污染物与植被消减大气颗粒物浓度的相关性分析

Table 3 Correlations between atmospheric particulate and toxic gases

大气污染物	TSP	PM_{10}	$\text{PM}_{2.5}$
二氧化硫	0.683**	0.776**	0.551*
氮氧化物	0.677**	0.820**	0.597*

注: ** 表示 $P < 0.01$ 显著性水平; * 表示 $P < 0.05$ 显著性水平。

表 4 大气污染物与植被消减大气颗粒物浓度的关系模型参数
Table 4 Parameters of the coorelation model between atmospheric particulate and toxic gases

模型及参数		TSP	PM_{10}	$\text{PM}_{2.5}$
$Y=ax+b$ (线性模型)		a	0.776	0.683
		b	$(-1.001) \times 10^{-13}$	$(-1.001) \times 10^{-13}$
		R^2	0.466	0.602
		P	0.000	0.004
二氧化硫		a	0.820	0.677
		b	$(-1.006) \times 10^{-13}$	$(-1.005) \times 10^{-13}$
		R^2	0.458	0.672
		P	0.000	0.004
氮氧化物		a	0.826	0.777
		b	0.059	-0.149
		c	-0.056	0.139
		R^2	0.486	0.676
		P	0.001	0.008
$Y=ax+bx^2+c$ (二次曲线模型)		a	0.782	0.825
		b	0.063	-0.210
		c	-0.059	0.197
		R^2	0.521	0.606
		P	0.002	0.004
二氧化硫		a	0.826	0.777
		b	0.059	-0.149
		c	-0.056	0.139
		R^2	0.486	0.676
		P	0.001	0.008
氮氧化物		a	0.826	0.777
		b	0.059	-0.149
		c	-0.056	0.139
		R^2	0.486	0.676
		P	0.001	0.008
$Y=ax+bx^2+cx^3+d$ (三次曲线数模型)		a	3.002	1.116
		b	0.028	0.000
		c	-1.212	-0.164
		d	-0.132	0.104
		R^2	0.557	0.748
		P	0.001	0.018
二氧化硫		a	2.838	1.171
		b	0.027	0.135
		c	-1.098	-0.222
		d	-0.122	0.013
		R^2	0.550	0.792
		P	0.000	0.019
氮氧化物		a	2.838	1.171
		b	0.027	0.135
		c	-1.098	-0.222
		d	-0.122	0.013
		R^2	0.550	0.792
		P	0.000	0.019

注: 二氧化硫和氮氧化物为因变量, TSP、 PM_{10} 和 $\text{PM}_{2.5}$ 为自变量, $n=16$ 。

二氧化硫和氮氧化物浓度的负相关关系, 对 TSP、 PM_{10} 和 $\text{PM}_{2.5}$ 与二氧化硫和氮氧化物进行回归分析, 经过 SPSS 21.0 软件处理后, 得出可以使用以下 3 种回归模型 $\text{Linear } Y=ax+b$ 、 $\text{Quadratic } Y=ax+bx^2+c$ 和 $\text{Cubic } Y=ax+bx^2+cx^3+d$ 进行拟合(表 4)。3 次曲线模型的拟合的效果最好, 拟合度最大(R^2 相对最大)。

3 结论与讨论

TSP 作为粗颗粒物, 由于重力沉降作用大, 在大气中存在的时间不长, PM_{10} 是由离子通过碰并、凝聚、吸附等物理效应长大而成, 也可由挥发性组分凝结, 气体转化成颗粒物, 这部分粒子在大气中存在的时间长, $\text{PM}_{2.5}$ 由污染气体经过复杂的多相大气化学反应转化而成, 或者由高温下排放的过饱和气态物质冷凝而成, 少量来自于自然界和人为源排放^[21]。二氧化硫和氮氧化物作为大气中的主要污

染物,大气颗粒物对大气中的有毒有害气体具有吸附作用^[22]。由于植被可以滞留不同粒径的大气颗粒物^[23],所以植被吸附大气颗粒物对二氧化硫和氮氧化物的浓度也会产生影响。本研究大气中二氧化硫和氮氧化物浓度变化与植被消减的TSP、PM₁₀、PM_{2.5}的浓度具有显著负相关性,说明植被对大气颗粒物的吸附量越大,大气中二氧化硫和氮氧化物浓度就会越低,其中与TSP、PM₁₀达极显著负相关,与PM_{2.5}达到了显著负相关。植物叶片对PM₁₀的滞留量占到滞留总颗粒物量的98%,其次为PM_{2.5}和TSP^[23],PM₁₀的浓度变化对二氧化硫和氮氧化物的影响分别占全部影响的74.8%、79.2%,所以,植物叶片对PM₁₀的滞留对大气中二氧化硫和氮氧化物的浓度影响最大。可见,城市园林植物在对大气颗粒物吸附的同时,也会间接减少大气中二氧化硫和氮氧化物的含量。

大气中二氧化硫和氮氧化物的浓度随季节有明显的变化,春季和冬季的浓度值高于夏季和秋季,植被对这2种大气污染物有良好的吸收效果,并且净化的大气污染物浓度均达到国家标准。由于气象因素的影响,植被对大气颗粒物的消减浓度随着季节的变化为:春季>冬季>秋季>夏季。由于昆明的夏季是雨季,降雨较多,空气中的粉尘伴随降雨直接进入土壤中,而叶片上所附着的颗粒物也会被冲刷掉,植被对颗粒物的消减作用会减弱,秋季和冬季植被对颗粒物的消减能力又逐渐增强。

大气颗粒物对大气中的有害气体具有一定的吸附作用,所以植被对大气颗粒物的消减量与二氧化硫和氮氧化物的浓度具有显著相关性,其中与PM₁₀具有极显著相关性,通过模型拟合,最终确定大气颗粒物的消减量与二氧化硫的一元三次模型是: $Y_{SO_2} = 1.116X_{PM_{10}} - 0.164X_{PM_{10}}^3 + 0.104 (R^2 = 0.748)$; $Y_{NO_x} = 1.171X_{PM_{10}} + 0.135X_{PM_{10}}^2 - 0.222X_{PM_{10}}^3 + 0.013 (R^2 = 0.792)$ 。植物叶片不仅可以直接吸收大气中二氧化硫和氮氧化物,也可以通过对大气颗粒物的滞留间接减少大气中二者的含量,所以在已知植物滞留颗粒物量的情况下,可以通过合理的数学模型,计算出间接所吸收的污染物二氧化硫和氮氧化物的浓度,为地方和区域环境监测和评价提供参考。

参考文献:

- [1] 卢芳. 大气中氮氧化物对生态环境的影响[J]. 青海师范大学学报:自然科学版, 2006 (3): 87-89.
- [2] 付晓萍, 田大伦. 酸雨对植物的影响研究进展[J]. 西北林学院学报, 2006, 21(4): 23-27.
- [3] FU X P, TIAN D L. Research progress of the effect of acid rain on plant[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2006, 21(4): 23-27. (in Chinese)
- [4] BECKETT K P, FREER-SMITH P H, TAYLOR G. Deposition velocities to *Sorbus aria*, *Acer campestre*, *Populus deltoides* trichocarpa 'Beaupré', *Pinus nigra* and *Cupressocyparis leylandii* for coarse, fine and ultra-fine particles in the urban environment[J]. Environmental Pollution, 2005, 133(1): 157-167.
- [5] BECKETT K P, FREER-SMITH P H, TAYLOR G. Effective tree species for local air quality management[J]. Journal of Arboriculture, 2000, 26(1): 12-19.
- [6] SONG Y, ZHANG Y, XIE S, et al. Source apportionment of PM_{2.5} in Beijing by positive matrix factorization[J]. Atmospheric Environment, 2006, 40(8): 1526-1537.
- [7] LIACOS J W, KAM W, DELFINO R J, et al. Characterization of organic, metal and trace element PM_{2.5} species and derivation of freeway-based emission rates in Los Angeles, CA[J]. Science of the Total Environment, 2012(435): 159-166.
- [8] SOLAZZO E, BIANCONI R, PIROVANO G, et al. Operational model evaluation for particulate matter in Europe and North America in the context of AQMEII[J]. Atmospheric Environment, 2012(53): 75-92.
- [9] WANG K, ZHANG Y, NENES A, et al. Implementation of dust emission and chemistry into the community multiscale air quality modeling system and initial application to an Asian dust storm episode[J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2012, 12(21): 10209-10237.
- [10] 张德强, 褚国伟, 余清发, 等. 园林绿化植物对大气二氧化硫和氟化物污染的净化能力及修复功能[J]. 热带亚热带植物学报, 2003, 11(4): 336-340.
- [11] ZHANG D Q, ZHU G W, YU Q F, et al. Decontamination ability of garden plants to absorb sulfur dioxide and fluoride[J]. Journal of Tropical and Subtropical Botany, 2003, 11(4): 336-340. (in Chinese)
- [12] BECKETT K P, FREER-SMITH P H, TAYLOR G. Urban woodlands: their role in reducing the effects of particulate pollution[J]. Environmental pollution, 1998, 99(3): 347-360.
- [13] CHEN Z X, SU X H, LIU S Z. Study of ecological effect of urban green space in Beijing[J]. Chin. Landscape Architech., 1998, 14(2): 51-54.
- [14] 么旭阳, 胡耀升, 刘艳红. 北京市8种常见绿化树种滞尘效应[J]. 西北林学院学报, 2014, 29(3): 92-95.
- [15] YAO X Y, HU Y S, LIU Y H, et al. Dust-retention effect of 8 common greening tree species in Beijing[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2014, 29(3): 92-95. (in Chinese)
- [16] 陈小平, 焦奕雯, 裴婷婷, 等. 园林植物吸附细颗粒物(PM_{2.5})效应研究进展[J]. 生态学杂志, 2014, 33(9): 2558-2566.
- [17] CHEN X P, JIAO Y W, PEI T T, et al. The effect of adsorbing fine particulate matter (PM_{2.5}) by garden plants: a review[J]. Chinese Journal of Ecology, 2014, 33(9): 2558-2566. (in Chinese)

- [14] 吴耀兴,康文星,郭清和,等.广州市城市森林对大气污染物吸收净化的功能价值[J].林业科学,2009,45(5):42-48.
- WU Y X, KANG W X, GUO Q H, et al. Functional value of absorption and purgation to atmospheric pollutants of urban forest in Guangzhou[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2009, 45(5): 42-48. (in Chinese)
- [15] 罗红艳,刘增.绿化树种对大气 SO₂ 的净化作用[J].北京林业大学学报,2000,22(1):45-50.
- LUO H Y, LIU Z. Effect of purifying SO₂ in atmosphere by greening tree species[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2000, 22(1): 45-50. (in Chinese)
- [16] 骆永明,查宏光,宋静,等.大气污染的植物修复[J].土壤,2002(3). 113-119
- [17] 管东生,刘秋海.广州城市建成区绿地对大气二氧化硫的净化作用[J].中山大学学报:自然科学版,1999,38(2):109-113.
- GUAN D S, LIU Q H. The role of Guangzhou urban vegetation in removing atmospheric sulfur[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni, 1999, 38(2): 109-113. (in Chinese)
- [18] CHANGLIAN P, DAZHI W E N, ZHIJIAN S U N. Response of some plants for municipal greening to air pollutants[J]. Journal of Tropical and Subtropical Botany, 2002, 10(4): 321-327.
- [19] ZHOU Z, SHAO T, WANG P, et al. The spatial structures and the dust retention effects of green-land types in the workshop district of Wuhan Iron and Steel Company[J]. Acta Ecologica Sinica, 2001, 22(12): 2036-2040.
- [20] GB 3095-2012. 环境空气质量标准[S]. 北京:中国标准出版社,2012
- [21] 刘玉堂.济南市大气颗粒物酸缓冲能力研究[D].济南:山东建筑大学,2010.
- [22] 张磊.成都市大气颗粒物中水溶性酸性离子的化学特性评价[D].成都:成都理工大学,2009.
- [23] 赵松婷,李新宇,李延明.园林植物滞留不同粒径大气颗粒物的特征及规律[J].生态环境学报,2014,23(2):271-276.
- ZHAO S T, LI X Y, LI Y M. The Characteristics of deposition of airborne particulate matters with different size on certain plants [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2014, 23(2): 271-276. (in Chinese)

(上接第 12 页)

- [22] 冯棣,张俊鹏,曹彩云,等.咸水畦灌条件下土壤水盐运移规律[J].水土保持学报,2011,25(5):48-52.
- FENG D, ZHANG J P, CAO C Y, et al. Soil water and salt migration under border irrigation with saline water[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2011, 25(5): 48-52. (in Chinese)
- [23] 万素梅,胡守林,瞿云龙.膜下滴灌棉花土壤水分动态变化研究[J].水土保持研究,2007,14(1):90-91.
- WAN S M, HU S L, ZHAI Y L. Studies on the dynamic change of soil water of cotton with drip irrigation[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2007, 14(1): 90-91. (in Chinese)
- [24] 魏光辉,董新光,杨鹏年,等.棉花膜下滴灌土壤盐分运移规律分析[J].水土保持研究,2009,16(6):162-166.
- WEI G H, DONG X G, YANG P N, et al. Study on soil salt movement in drip irrigation of cotton under the plastic mulch [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2009, 16(6): 162-166. (in Chinese)
- [25] 李林英,齐实,王棣,等.汾河上游河岸带植被类型变化对土壤粒级组成及土壤水分的影响[J].东北林业大学学报,2009,37(6):23-24.
- LI L Y, QI S, WANG D, et al. Differences in soil particle composition and soil water content for different vegetation types in the riparian zones of the upstream of Fenhe River, Shanxi Province[J]. Journal of Northeast Forestry University, 2009, 37(6):23-24. (in Chinese)
- [26] 莫治新,王冀平.植被覆盖对土壤水盐空间分布规律的影响[J].河南农业科学,2009(3):43-46.
- MO Z X, WANG J P. Effects of the plant covering on the spatial distribution of the soil moisture and salt[J]. Journal of Henan Agricultural Sciences, 2009(3): 43-46. (in Chinese)
- [27] 刘普幸,张克新,霍华丽,等.疏勒河中下游绿洲胡杨林土壤水盐的空间变化特征与成因[J].自然资源学报,2012,27(6): 942-952.
- LIU P X, ZHANG K X, HUO H L, et al. Characteristics and causes of the spatial variations of soil water and salt content under *populus euphratica* oliv. in the middle and lower reaches of the Shule River basin[J]. Journal of Natural Resources, 2012, 27(6): 942-952. (in Chinese)
- [28] KONUKCU F, GOWING J W, ROSE D A. Dry drainage: a sustain-able solution to water logging and salinity problems in irrigation areas [J]. Agricultural Water Management, 2006, 83(1/2): 1-12.
- [29] 李洪,黄国强,李鑫钢.自然条件下土壤不饱和区中水含量分布模拟[J].农业环境科学学报,2004,23(6):1232-1234.
- LI H, HANG G Q, LI X G. HYDRUS-2D modeling of water contents in soils under climatic conditions[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2004, 23 (6): 1232-1234. (in Chinese)