

城市林地与非林地大气 SO₂ 季节动态变化

闫文德, 田大伦*, 项文化, 黄志宏

(中南林业科技大学生态研究室, 湖南长沙 410004)

摘要: SO₂ 作为主要的大气污染物之一, 对人体与环境具有严重危害, 导致酸雨后危害更大, 尤其是长江以南省区污染严重。对长沙和株洲市区内 2 种类型区域——城市林地与城市非林地空气 SO₂ 浓度通过近 1 a (2004-01 ~ 2005-01) 的同时进行对比定位观测, 用甲醛吸收副玫瑰苯胺分光光度法分析, 结果表明: 从两市 2 种类型采样地空气 SO₂ 浓度水平总体与分别来看, SO₂ 浓度年内变化均具有明显季节性波动特征 ($p = 0.001$), 冬季最高, 秋季最低; 除冬季二者 SO₂ 浓度较为接近外, 其他各季株洲非林地观测区 SO₂ 浓度均高于同季节长沙非林地观测区 SO₂ 浓度。空气 SO₂ 浓度季节性变化与当地的地理环境、气候条件、采暖期与工业生产布局等因素有较大的关系。其中, 燃煤、降水、风速风向和气温是影响空气 SO₂ 浓度变化主要的污染源与气候条件因素。空气 SO₂ 浓度水平还与所在地有无林木覆盖关系密切。无林地空气 SO₂ 浓度年均值 (0.18 ± 0.08) mg/m³, 有林地空气 SO₂ 浓度年均值 (0.09 ± 0.07) mg/m³, 二者间存在极其显著差异 ($p = 0.001$)。林木生理活性季节性变化对植物调节空气 SO₂ 浓度季节变化的能力有一定的影响。按林地 SO₂ 浓度减缓效应大小排序, 依次是夏季 (55.4%) > 冬季 (54.1%) > 秋季 (49.3%) > 春季 (29.6%)。城市森林作为一种有效的生物措施在控制和治理城市大气 SO₂ 污染实践中具有重要作用, 不失为一种经济可行、高效的环境保护措施, 应着力提高城市森林覆盖率。

关键词: 城市有林地; 城市非林地; 大气 SO₂ 浓度; 季节变化

文章编号: 1000-0933(2006)05-1367-08 中图分类号: Q143, Q948, S718.55, X511 文献标识码: A

Seasonal change in atmospheric SO₂ concentration in forested and non-forested urban lands

YAN Wen-De, TIAN Da-Lun*, XIANG Wen-Hua, HUANG Zhi-Hong (Research Section of Ecology, Central-south Forestry University, Changsha, Hu'nan 410004, China). *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(5): 1367 ~ 1374.

Abstract: As one of the most dominant pollutants in the air, the pollution of sulfur dioxide can cause significant damage to the surrounding population and environment. The acid rain caused by sulfur dioxide do much more harm to environment than pollution of sulfur dioxide, which is endangering the most regions of south China. In order to assess the role played by forests in the urban ecosystems, the atmospheric SO₂ concentration was measured continually from Jan., 2004 to Jan., 2005 in specifically selected forested and non-forested sites of the campus within Changsha and Zhuzhou cities, Hunan Province, representing two types of area, respectively. The prosaniline formaldehyde spectrophotometric method was employed to determine atmospheric SO₂ content. The results showed that the atmospheric SO₂ concentration in both site categories exhibited a significant seasonal fluctuation ($p = 0.001$) with the highest in winter and the lowest in autumn. The seasonal change in SO₂ concentration was closely related to local

基金项目: 国家科技部攻关资助项目 (2001BA510B11-01); 国家自然科学基金资助项目 (30271043, 30571487); 国家科技部平台建设资助项目 (20021220); 中南林业科技大学高层次人才引进资助项目; 湖南省青年骨干教师培养对象资助项目

收稿日期: 2006-01-23; **修订日期:** 2006-04-20

作者简介: 闫文德 (1969 ~), 男, 甘肃武威人, 博士, 副教授, 主要从事森林生态学研究. E-mail: csfuywd@hotmail.com

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: csfuywd@hotmail.com

Foundation item: The project was supported by Key task project of the Ministry of Science and Technology of China (No. 2001BA510B11-01); National Natural Science Foundation of China (No. 30271043, 30571487); Platform construction project of the Ministry of Science and Technology of China (20021220); High talent indraught project of Central-south Forestry University; the project of training key young teachers in Hu'nan Province

Received date: 2006-01-23; **Accepted date:** 2006-04-20

Biography: YAN Wen-De, Ph. D., Associate professor, mainly engaged in forest ecology. E-mail: csfuywd@hotmail.com

geographical condition, climatic characteristic, heating period, and distribution of urban industry district. It was found that coal burning was the dominant pollution source, and precipitation, wind speed and direction, and temperature were the dominant factors for affecting atmospheric SO_2 concentration in the cities. In addition, SO_2 concentration level in the atmosphere had a tight relationship with the urban forest cover. The annual mean atmospheric SO_2 concentration was significantly higher in the non-forested sites ($(0.18 \pm 0.08) \text{ mg/m}^3$) than in the forest sites ($(0.09 \pm 0.07) \text{ mg/m}^3$). Tree physiological activities made a contribution in the decrease of the atmospheric SO_2 concentration in urban forest sites. According to the abating effect amount of atmospheric SO_2 concentration in forested sites, it ranked as summer(55.4%) > winter(54.1%) > autumn(49.3%) > spring(29.6%). Our results demonstrated that urban forest played an important role in controlling and reducing the atmospheric SO_2 concentration in urbanized areas. Therefore, to sustain urban forest resources and increase urban forest canopy cover will be benefit to improve environmental quality, enhance human health, and enrich urban beauty.

Key words: urban forests; urban ecosystems; forest cover; atmospheric SO_2 concentration; seasonal change

酸雨是世界十大环境问题之一。近年来,由于经济的快速发展,同时随着城市化进程,加快,我国城市环境污染问题日趋严重。大量排放 SO_2 和烟尘,导致越来越多的酸雨和大气污染。根据国家环保总局多年监测结果表明,有 62.3% 的城市 SO_2 年平均浓度超过国家二级标准(0.06 mg/m^3),日平均浓度超过国家三级标准(0.25 mg/m^3)^[1]。且我国酸雨主要分布在长江以南各省市,对生态系统的危害日益严重,仅对南方 11 省区森林生态效益造成的经济损失就高达 162.30 亿元^[2],成为制约城市可持续发展的主要障碍。冯宗炜^[2]对我国酸雨的生态影响和防治对策进行过较为系统的研究。2002 年的环境保护公报结果显示,47 个全国环境保护重点城市中,其中包括长沙在内的 11 个城市 SO_2 浓度超标^[3];长沙、株洲也是湖南省境内受酸雨污染较为严重的城市,年均 pH 值 5.0 以下,年酸雨频率在 72.6% ~ 100.0% 之间^[4,5],是全国酸雨污染最严重的区域之一^[6]。这些情况表明,我国南方地区城市环境保护仍然面临着巨大的压力与挑战。如何解决由 SO_2 引发的环境问题,人们寄希望于城市森林生态作用的发挥。城市森林^[7]是城市生态系统的重要组成部分,具有重要的生态服务功能,有利于维持城市生态系统的健康和平衡,是城市可持续发展的基础和保障^[8-12]。有关学者在湖南省对此从大气污染、大气湿沉降化学角度开展了相关研究^[13-16],但大气污染指标不能直接反映对植物伤害程度的大小,也不能反映出城市森林对大气污染的减缓效应。长沙、株洲正在着力开展城市森林建设,以减轻大气污染对城市生态环境所面临的压力。因此,研究城市森林对 SO_2 浓度调节效应对于正确评价森林作用和科学治理大气污染具有十分重要的意义。

1 研究地概况

研究样地分别位于中南林学院长沙校区($112^\circ 59' \text{E}$, $28^\circ 08' \text{N}$)和株洲校区($112^\circ 54' \text{E}$, $27^\circ 50' \text{N}$),两地水平距离约 40km,海拔在 50 ~ 200m 之间,相对高度 100m,均属低山丘陵区,气候系典型的亚热带季风性湿润气候。长沙年均降水量 1378mm,年相对湿度 80%,年均气温 17.1°C ;株洲年均降水量 1431mm,集中于 4 ~ 7 月份,年相对湿度 80%,年平均气温为 17.4°C 。本区地层古老,母岩以变质板页岩为主,风化程度较深,土壤为森林红壤,呈酸性。地带性植物为常绿阔叶林。

在中南林学院长沙校区和株洲校区分别设有两个采样点。长沙校区非林地(城市交通干道两侧区域)采样点在学校门口,距离采样点 50m 是长沙市的交通干道——韶山南路,作为无林区代表;对照区为有林地,采样点在校内树木园内。株洲非林地(城市交通干道两侧区域)采样点设在株洲校区校门口田龙路旁(长沙至株洲主干道)50m 处。该点处于清水塘工业区的下风向,代表无林地;其对照区为有林地,采样点也在学校树木园内。两校区的非林地采样点与有林地对照点相距约 300m。两校区的对照区调查的林分均为樟树人工林,郁闭度为 0.7 ~ 0.8。林下植物主要有杉木(*Cunninghamia lanceolata*)、女贞(*Ligustrum lucidum*)、小叶女贞(*Ligustrum quihoui*)、菝葜(*Smilax china*)、山胡椒(*Lindera glauca*)、木莓(*Rubus swinhoei*)、油茶(*Camellia oleifera*)、大叶黄杨(*Buxus megistophylla*)、满树星(*Ilex aculeolata*)、南蛇藤(*Celastrus orbiculatus*)、铁芒萁(*Dicranopteris*

dichotoma)等。长沙、株洲有林地林分均处于半自然状态。

2 研究方法

2.1 空气 SO₂ 采样与标准曲线绘制

观测于 2004 年 1 月~2005 年 1 月期间进行。每季监测 1 次,每次监测时间为 5~7 个监测日。选取有效数据,在监测期间内如遇恶劣气象条件,则相应补充监测。

3,6,9,12 月份采样时间为 8:00~9:20 和 13:00~14:20,连续 5~7 d 在同一地点用大气采样器——气体-2B 型采样器(武汉分析仪器厂)进行大气采样。采样离地面高度约 1.5m,采样器流量 0.5 L/min,采样持续时间 80 min(40L),并记录现场的气压和气温、空气湿度。共采集样品 180 个。

用甲醛吸收副玫瑰苯胺分光光度法(国际标准 GB/T15262-1994)测定样品中 SO₂ 含量。用氨基磺酸铵、甲醛、盐酸副玫瑰苯胺溶液配制标准液,以水为参比,测定吸光度。以吸光度(用消光值表示)与 SO₂ 含量(μg)绘制标准线,标准曲线见图 1。

$$y = 0.29 + 96.50x \quad (R^2 = 0.99) \quad (1)$$

式中, y 为 SO₂ 含量(10^{-3} mg), x 为消光值。

2.2 样品分析

采集的样品用甲醛吸收副玫瑰苯胺分光光度法测定 SO₂ 含量,然后根据样品数量计算样品中 SO₂ 浓度 W (mg/m^3),计算公式如下:

$$W = \frac{y}{V_n} \times \frac{V_t}{V_a} \quad (2)$$

式中, W 为样品中 SO₂ 浓度(mg/m^3); y 为样品溶液中 SO₂ 含量(μg ,由标准曲线查知); V_n 为标准状态下的采样体积(L)(时间(min)×流速(L/min)); V_t 为所取样品溶液的总体积(ml); V_a 为测定时所用样品溶液体积(ml)。

3 结果与分析

3.1 长沙、株洲两观测点空气 SO₂ 浓度总体季节变化总体特征

根据 2004 年观测结果,从两市总体上来看,SO₂ 浓度年变化具有季节性波动特征(图 2a)。所有观测点总体上的 SO₂ 浓度变化季节特征表现为,春季 SO₂ 浓度最高($(0.18 \pm 0.11) \text{ mg}/\text{m}^3$),其次为冬季($(0.14 \pm 0.07) \text{ mg}/\text{m}^3$),再次是夏季($(0.13 \pm 0.07) \text{ mg}/\text{m}^3$),秋季最小($(0.08 \pm 0.05) \text{ mg}/\text{m}^3$)。两个城市的总体平均值为(0.13 ± 0.04) mg/m^3 。长沙、株洲两个城市的 SO₂ 浓度季节变化特点又各有差异(图 2b)。长沙市观测点 SO₂ 浓度年变化季节性特征表现为冬季 SO₂ 浓度最高($(0.14 \pm 0.07) \text{ mg}/\text{m}^3$),其次为春季($(0.13 \pm 0.06) \text{ mg}/\text{m}^3$),接下来是夏季($(0.12 \pm 0.07) \text{ mg}/\text{m}^3$),秋季最小($(0.07 \pm 0.04) \text{ mg}/\text{m}^3$)。这种季节变化与长沙市的酸雨污染季节特征^[14]相似,同湖南省的大气环境质量变化特征相似^[17]。长沙市试验区 SO₂ 浓度年均值(0.12 ± 0.07) mg/m^3 。株洲 SO₂ 浓度年变化季节性特征与长沙有所不同,SO₂ 浓度最大值出现在春季($(0.18 \pm 0.11) \text{ mg}/\text{m}^3$);其次为冬季($(0.14 \pm 0.07) \text{ mg}/\text{m}^3$),第三为夏季($(0.13 \pm 0.07) \text{ mg}/\text{m}^3$),最小值出现在秋季($(0.08 \pm 0.05) \text{ mg}/\text{m}^3$)。株洲市试验区 SO₂ 浓度年均值(0.15 ± 0.09) mg/m^3 ,空气 SO₂ 污染较严重。

试验区总体 SO₂ 浓度季节变化的单因素方差分析(ANOVA)结果表明,各个季节间差异达到极其显著的水平($p = 0.001, n = 328$),说明试验区 SO₂ 浓度从总体上看季节性变化特征非常明显。分别对长沙市、株洲市试

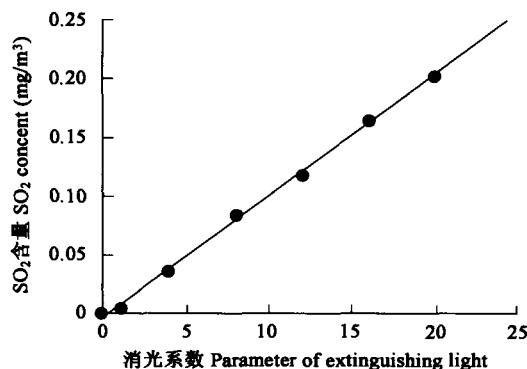


图 1 SO₂ 含量标准曲线

Fig.1 Standard curve for SO₂ content

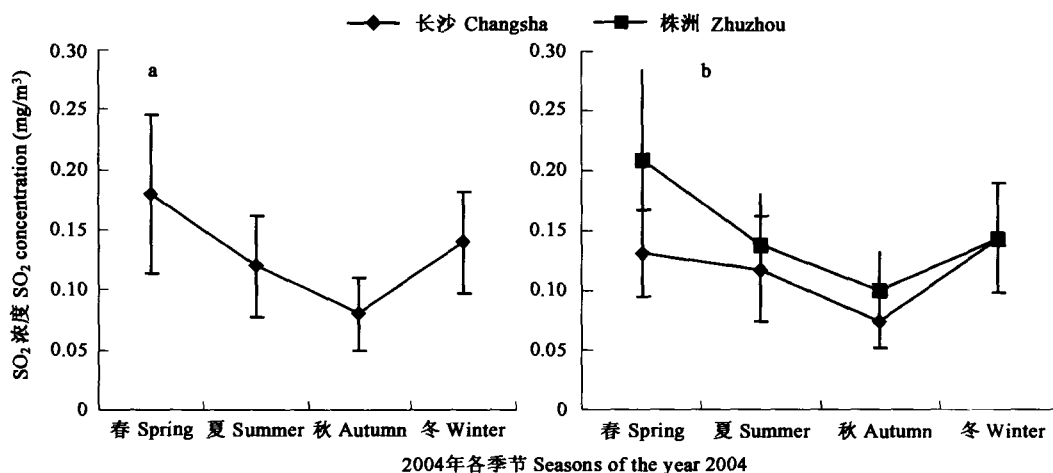


图2 两市观测点空气 SO_2 浓度季节动态(a)两样地综合值(b)两样地分开值

Fig. 2 Seasonal dynamics of SO_2 concentration in the two cities (a) as a whole and (b) as individual in 2004

验区总体 SO_2 浓度季节间差异水平的单因素方差分析(ANOVA),结果表明,二者 SO_2 浓度季节间差异均达到极其显著的水平(长沙, $p = 0.001$, $n = 152$; 株洲, $p = 0.001$, $n = 176$)。通过分组分析,试验区总体 SO_2 浓度季节变化可分为3组,秋季为一组,夏季、冬季可归为一组,春季单列为一组。 SO_2 浓度季节变化特征与湖南省酸雨污染冬季重于夏季的特征^[13]相吻合。

3.2 城市非林地 SO_2 浓度季节变化特征

从两个城市总体来看,非林地 SO_2 浓度存在一定的季节波动(图 3a)。各季节按 SO_2 浓度大小排序依次为:春季($(0.21 \pm 0.11) \text{ mg/m}^3$) > 冬季($(0.19 \pm 0.06) \text{ mg/m}^3$) > 夏季($(0.17 \pm 0.06) \text{ mg/m}^3$) > 秋季($(0.12 \pm 0.05) \text{ mg/m}^3$)。单因素方差分析(ANOVA)结果显示非林地 SO_2 浓度季节变化差异达到显著性水平($p = 0.001$)。就长沙、株洲两市分别而言,其非林地 SO_2 浓度季节变化趋势有相似之处,株洲非林地 SO_2 浓度均高于同季节长沙非林地 SO_2 浓度(图 3b)。城市非林地 SO_2 浓度季节变化在一定程度上更能反映城市的 SO_2 浓度季节性变化。

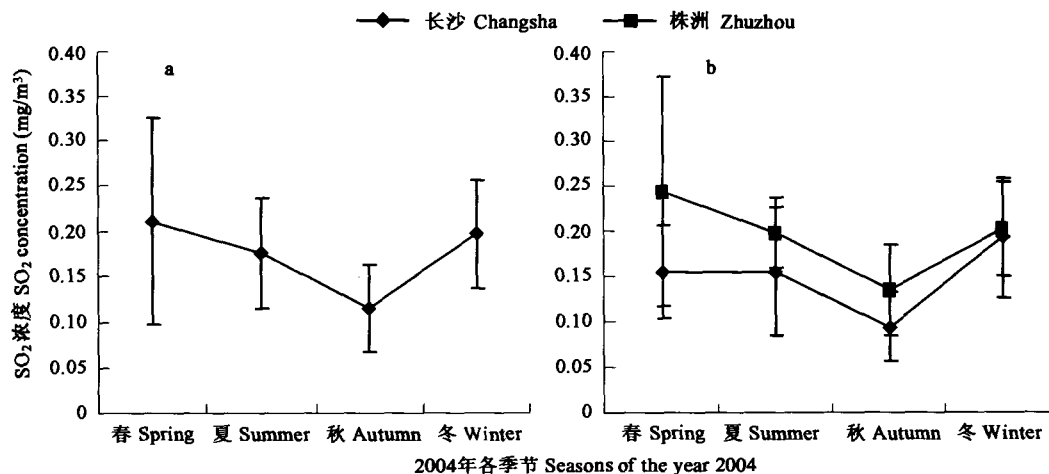


图3 长沙、株洲两样地非林地观测点空气 SO_2 浓度(a)为两地平均水平,(b)为两地各自水平

Fig. 3 Seasonal dynamics of atmospheric $[\text{SO}_2]$ at non-forested plots in two cities (a) for the two cities as a whole and (b) for each of them

长沙、株洲非林地空气 SO_2 浓度变化的季节特征与变化趋势与两个城市的区域地理环境、气象条件、采暖

期以及工业生产布局等有着密切的关系。

对长沙市而言,非林地 SO₂ 浓度季节变化受长沙市的地理环境、全年风向与风速、城市热岛效应及采暖期等的影响甚大。长沙市平均海拔高度为 40 多米,东南西三方地势较高,北边为敞口。长沙市常年主导风向为西北风,其频率约为 39%,且多出现在冬季,夏季主导风向为西南和东南风。大气低层有明显的逆温现象,且具有明显的季节性变化。冬季逆温层的平均高度仅为夏季的 1/3.5,而逆温强度冬季大于夏季,不利于本地区大气污染物的扩散。有研究表明,SO₂ 浓度与逆温强度有较强的正相关性^[18]。长沙市区空气中 SO₂ 主要来源于工业生产和人类活动为主^[4]。冬季是主要的采暖期,SO₂ 的燃放量大大超过非采暖期。加之,冬春季持续干旱,风速偏小基本上是 2~3 级,气流稳定,SO₂ 的扩散比较缓慢,空气中 SO₂ 的浓度较高;长沙年平均风速为 2.6m/s,年静风频率约为 24%,小风频率约为 50%。冬季风速偏小,静风频率明显偏大;夏季不稳定频率高于冬季;夏秋季雨水较多,风速达到 5~6 级,连续的降雨和强风使得空气中 SO₂ 被稀释沉降和扩散,空气中 SO₂ 的浓度大大减少,空气比较纯净。长沙市区空气 SO₂ 浓度季节变化受到了上述诸因子的综合影响,是其季节性变化的主导因素。

同长沙市相比,株洲市的非林地空气 SO₂ 浓度季节变化的影响因素又有其特殊性。城市空气 SO₂ 主要来源于矿物燃烧,其中主要是采暖与工业生产可成为当地的主要污染源^[19]。2004 年湖南全省工业排放 SO₂ 量占当年排放量的 81.6%,生活排放量占 18.4%^[20]。煤烟型的主要污染物之一是 SO₂,表现出明显的季节性^[21]。株洲市地处于湖南省东部,是一个新兴的工业城市,重工业比重大,能源消耗过大,SO₂ 排放多。如株洲冶炼厂 SO₂ 年排放量占市区排放总量的 67.8%;株洲电厂 SO₂ 年排放量占市区排放总量的 12%。株洲市区较高的工业生产耗能释放的 SO₂ 量是导致该市空气 SO₂ 浓度一直维持在较高水平的原因。株洲非林地观测点处在 SO₂ 污染源主风向下风向区域,全年内受到明显污染^[22]。事实上,株洲空气 SO₂ 浓度各季节均高于长沙,这种情况只是在冬季有所改变,即冬季长沙市空气 SO₂ 浓度与株洲市接近(图 3b)。株洲的 SO₂ 年排放强度大于长沙^[23],在这种情况下,污染源的排放作用可能较气象条件所起的作用更大^[24]。这也在一定程度上说明了冬季采暖对城市空气 SO₂ 浓度有较大的贡献。

3.3 城市林地 SO₂ 浓度季节变化特征

有林地空气 SO₂ 浓度季节变化与非林地 SO₂ 浓度季节变化相比,既具有相似之处,又有不同之处,且各季节的林地 SO₂ 浓度均比非林地 SO₂ 浓度要低(图 4a)。林地 SO₂ 浓度受非林地 SO₂ 浓度季节变化影响,因此二者具有相似的季节变化趋势,另一方面还受林木自身的生理作用所调节。长沙、株洲有林地空气 SO₂ 浓度季节变化,二者具有较大的一致性(图 4b)。同非林地 SO₂ 浓度年均值相比,有林地 SO₂ 浓度年均值相当于其中的 53.3%,下降了 45.7%。

为比较不同季节有林地对空气 SO₂ 浓度的减缓效应,可用非林地 SO₂ 浓度减去有林地 SO₂ 浓度,然后与非林地 SO₂ 浓度相比较,结果见图 5a、5b。从中可知,按林地 SO₂ 浓度减缓效应大小排序,依次是:夏季(55.4%)> 冬季(54.1%)> 秋季(49.3%)> 春季(29.6%)。

具有较高郁闭度的森林树木能够减弱空气的流动,使得空气中的 SO₂ 被阻滞沉降在林内,阻碍其向周围扩散,减轻空气污染;树木还可通过叶片气孔吸收 SO₂,同时 SO₂ 能够促进叶片气孔的张开,提高叶片吸收 SO₂ 的速率。另外,处于生长旺盛时期的树木,当光合作用达到最大值时,叶片吸收 SO₂ 也最强烈,因为气体污染物主要是通过气孔进入植物的^[25]。这可能是夏季的减缓效应值最大的一个主要原因。

林地减缓 SO₂ 浓度效应的最小值出现在春季(图 5b),比冬季的小,出现这种现象的原因可能与以下两方面的原因有关系。一方面,与冬、春季的天气情势有一定关系。冬、春季风速偏小且静风频率明显偏大,加上逆温强度较大。这些条件均不利于大气污染物的扩散,也不利于 SO₂ 浓度向叶片间扩散,从而叶片的 SO₂ 吸收效率降低。另一方面,与冬季林木的生长生理活动有关。冬、春季节的持续低温与干旱,可能导致林木生理

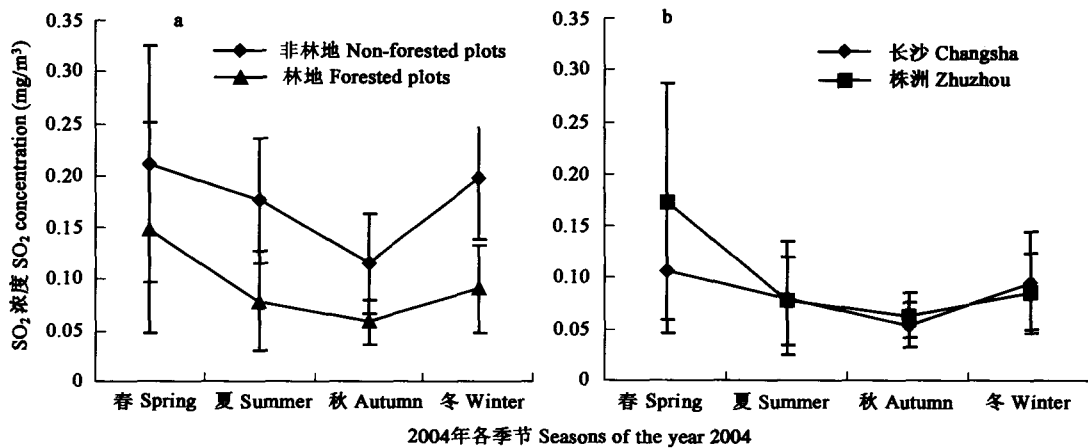


图4 两种类型样地空气 SO₂ 浓度季节动态比较(a)非林地与林地,(b)长沙林地与株洲林地

Fig.4 Comparison of seasonal dynamics of SO₂ concentration (a) for non-forested vs forested sites, and (b) for Changsha vs Zhuzhou forested sites

活动减弱;空气中 SO₂ 浓度冬、春季一直维持在较高的水平,春季空气 SO₂ 浓度比冬季还要高,这可能导致林木对 SO₂ 的吸收与代谢功能下降,并可能产生 SO₂ 伤害。因为,SO₂ 对植物的伤害会导致植物净光合速率、蒸腾速率、气孔导度等的下降^[26],也可导致植物的衰老^[27]。蒋益民等^[28]在韶山研究森林复合冠层化学沉降时发现类似现象,这可能与处于生长初期的树木生理活性较低有关^[29]。黄益江等^[30]发现马尾松在清明前后第1次抽梢时受害最严重,新叶呈褐色坏死,生长受到伤害。樟树是常绿阔叶林树种,但在春季3~4月间有较大的落叶现象,这与经过冬季、早春长时间的低温和持续干旱有密切的关系。叶面积指数的锐减在一定程度上明显影响叶片吸收、阻滞 SO₂ 的能力。这可能是春季有林地对 SO₂ 减缓能力比冬季弱的另一方面原因。植物不同生长阶段如发叶、落叶期等都会影响其对大气污染反应的敏感程度,也会影响植物对大气污染物的吸收、转化等能力。也有研究表明,大气污染能明显促进植物的衰老,并对植株后来的生长影响很大^[31]。

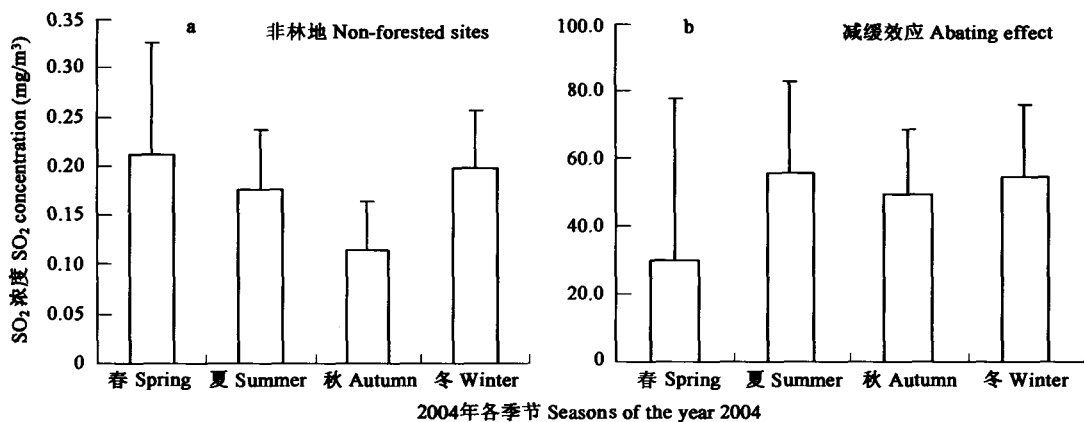


图5 SO₂ 浓度季节变化比较(a)非林地(b)林地减缓效应

Fig.5 Comparison of seasonal variation in SO₂ concentration (a) for non-forested sites and (b) for abating effect of forested sites.

4 结论

在推进城市化进程的过程中面临的主要环境问题之一是城市环境污染,特别是工业和生活排放 SO₂ 对环境污染较重,已成为城市生态系统的一大难题。长沙、株洲是湖南省两个比较大的城市,人口多、工业发展相对较快,SO₂ 污染较重。根据2004年测定结果,可得出如下几条结论:

(1)城市非林地空气 SO₂ 浓度在年内呈现出季节性变化,冬春较高、夏秋较低;长沙冬季 SO₂ 浓度是秋季

的 2.02 倍,株洲冬季的是秋季的 1.43 倍。

(2)城市非林地空气 SO₂ 浓度季节变化特征与当地的地理环境、气象条件及采暖期有着密切的关系,燃煤、降水、风速风向和气温是影响空气 SO₂ 浓度季节变化的主要因素。

(3)城市森林(有林地)空气中的 SO₂ 浓度季节变化趋势与城市非林地的 SO₂ 浓度的相似,但城市有林地空气中的 SO₂ 浓度明显低于城市非林地的 SO₂ 浓度。长沙、株洲有林地空气 SO₂ 浓度年均值较非林地年均值下降 45.7% 左右。城市森林通过对空气 SO₂ 吸收、存贮和沉降,具有明显的降低作用。

因此,提高城市造林绿化率是目前治理城市 SO₂ 污染比较有效的生物措施之一,加强造林绿化和森林植被保护是林业、环保和全社会共同关注的关系人类生存问题的大事,是今后城市建设的重要工作。

References:

- [1] State Environmental Protection Administration of China. Planning of pollution control region of acid rain and SO₂ in China. <http://www.zhb.gov.cn/eic/650490891693195264/20030214/1036812.shtml>.
- [2] Feng Z W. Impacts and control strategies of acid deposition on terrestrial ecosystems in China. *Engineering Science*, 2000, 2(9): 5 ~ 11.
- [3] State Environmental Protection Administration of China. 2002 Report on the state of environment in China. *Chinese Journal of Environmental Protection*, 2003, 7: 3 ~ 13.
- [4] Jiang Y M, Zeng G M, Zhang G, *et al.* Atmospheric acid deposition chemistry and the variational characteristics in Changsha city. *Urban Environment & Urban Ecology*, 2003, 16(Suppl.): 23 ~ 25.
- [5] Zhang G, Zeng G M, Jiang Y M, *et al.* Analysis on the variant characteristics, present situation and origin of acid rain in Hu'nian Province. *Research of Environmental Sciences*, 2003, 16(5): 14 ~ 17.
- [6] Editorial committee of Annals of Hu'nian. *Annals of Hu'nian*. Changsha: Hu'nian Xinghua Publishing Press, 2000. 241 ~ 243.
- [7] Miller R W. *Urban Forestry*. New Jersey: Prentice Hall, 1996.
- [8] Zhu W Q, He X Y, Chen W. Advances in urban forest. *Chinese Journal of Ecology*, 2001, 20(5): 55 ~ 59.
- [9] Hu L P. Urban forests and urban greening sustainable development. *Research on Morden City*, 2002, 2: 14 ~ 16.
- [10] He X Y, Jin Y S, Zhu W Q, *et al.* Basic theory and research method of urban forest ecology. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2002, 13(12): 1679 ~ 1683.
- [11] Jiang Y X. Urban forest is fundamental to modern sound urban ecosystem. *Journal of Chinese Urban Forestry*, 2004, 2(2): 4 ~ 7.
- [12] Wang C, Cai C J, Tao K H. The concept, range and research area of urban forest. *World Forestry Research*, 2004, 17(2): 23 ~ 27.
- [13] Wu F C, Wu J W, Wang X Y, *et al.* Study on acid rain pollution in Hunan province. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2000, 20(6): 807 ~ 809.
- [14] Zheng Y Y, Wu F C. Study on acid rain pollution in Changsha city. *Acta Sci. Nat. Univ. Norm. Hu'nian*, 2000, 23(1): 89 ~ 92.
- [15] Lu H Z, Wu F C. Analysis on air quality in major cities of Hunan province. *Yunnan Geographic Environment Research*, 2003, 15(2): 78 ~ 82.
- [16] Zhang G, Zeng G M, Jiang Y M, *et al.* Study on the atmospheric chemistry of wet deposition in Hu'nian Province. *Environmental Monitoring in China*, 2003, 19(5): 7 ~ 11.
- [17] Xiong M Y, Lu H Z, Wu F C. Analysis on air quality in major cities of Hu'nian Province. *Jour. Nat. Scie. Hu'nian Norm. Uni.*, 2003, 26(1): 89 ~ 92.
- [18] Zheng H, Zheng K, Zhang G H, *et al.* Atmospheric pollution in Harbin in winter and influence of inversion on pollutant diffusion. *Journal of Natural Disasters*, 2005, 14(4): 39 ~ 43.
- [19] He K B, Yu X C, Lu Y Q, *et al.* Characterization of urban air pollution sources. *Urban Environment & Urban Ecology*, 2003, 16(6): 269 ~ 271.
- [20] Environmental protection Bureau of Hu'nian. 2004 Report on the state of environment in Hu'nian Province. <http://www.hbj.hunan.gov.cn/WzDisplay.aspx?id=598>.
- [21] Yu S Q, Lin X C, Xu X D. Temporal and spatial characteristics of air pollution in Beijing. *Journal of Applied Meteorological Science*, 2002, 13(Suppl.): 92 ~ 99.
- [22] Wu Z Q, Liu G S, Xu G Q, *et al.* Application of Gaussian model in analysis of sulfur dioxide distribution regularity in urban district of Zhuzhou. *Hu'nian Nonferrous Metals*, 2004, 20(2): 33 ~ 35.
- [23] Jiang Y M, Zeng G M, Zhang G, *et al.* Present situation and geographical distribution of emission intensity of sulfur dioxide and trend in Hu'nian province. *Journal of Hu'nian University (Natural Sciences)*, 2004, 31(6): 75 ~ 79.
- [24] Zhang X L, An J L, Cheng X J, *et al.* Effect of evolutions of source emissions and meteorological factors on SO₂ distribution and sulfur deposition in China. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2003, 27(5): 939 ~ 947.

- [25] Jiang G M. Research on quantitative models for bio-monitoring and bio-assessing air pollution by plant sulfur content methods. *China Environmental Science*, 1995, 15(3): 208 ~ 214.
- [26] Wen D Z, Kong G H, Zhang D Q, *et al.* Ecophysiological responses of 30 gardens plant species exposed to short-term air pollution. *Acta Phytocologica Sinica*, 2003, 27(3): 311 ~ 317.
- [27] Siegel B Z, Galston W. The peroxidase of *Pisum sativum*. *Physiology Plant*, 1967, 42: 212 ~ 226.
- [28] Jiang Y M, Zeng G M, Zhang G, *et al.* Precipitation chemistry in the multiple canopies of Shaoshan forest in Hu'nan Province. *Chinese Journal of Ecology*, 2005, 24(2): 113 ~ 117.
- [29] Draaijers G P J, Ivens P M F, Bleuten W. Atmospheric deposition in forest edges measured by monitoring canopy throughfall. *Water, Air & Soil Pollution*, 1988, 42: 129 ~ 136.
- [30] Huang Y J, Chen D M, Liu Y M, *et al.* Effects of air pollution by sulfur dioxide on masson pine growth. *Journal of Zhejiang Forestry College*, 1998, 15(2): 127 ~ 130.
- [31] Kong G H, Lu Y D, Liu S Z, *et al.* Injury symptoms of 38 woody species exposed to air pollutants. *Journal of Tropical and Subtropical Botany*, 2003, 11(4): 319 ~ 328.

参考文献:

- [1] 国家环境保护总局. 酸雨控制区和二氧化硫污染控制区划方案. <http://www.zhb.gov.cn/eic/650490891693195264/20030214/1036812.shtml>.
- [2] 冯宗炜. 中国酸雨对陆地生态系统的影响和防治对策. *中国工程科学*, 2000, 2(9): 5 ~ 11.
- [3] 国家环境保护总局. 2002 年中国环境状况公报. *环境保护*, 2003, 7: 3 ~ 13.
- [4] 蒋益民, 曾光明, 张龚, 等. 长沙市大气湿沉降化学及变化特征. *城市环境与城市生态*, 2003, 16(Suppl.): 23 ~ 25.
- [5] 张龚, 曾光明, 蒋益民, 等. 湖南省酸雨变化特征、现状及成因分析. *环境科学研究*, 2003, 16(5): 14 ~ 17.
- [6] 湖南年鉴编委会. 湖南年鉴. 长沙: 湖南新华出版社, 2000. 241 ~ 243.
- [8] 朱文泉, 何光元, 陈玮. 城市森林研究进展. *生态学杂志*, 2001, 20(5): 55 ~ 59.
- [9] 胡丽萍. 城市森林与城市绿化可持续发展. *现代城市研究*, 2002, 2: 14 ~ 16.
- [10] 何兴元, 金莹杉, 朱文泉, 等. 城市森林生态学的基本理论与研究方法. *应用生态学报*, 2002, 13(12): 1679 ~ 1683.
- [11] 蒋有绪. 城市森林是现代化健全的城市生态系统的基础. *中国城市林业*, 2004, 2(2): 4 ~ 7.
- [12] 王成, 蔡春菊, 陶康华. 城市森林的概念、范围及其研究. *世界林业研究*, 2004, 17(2): 23 ~ 27.
- [13] 吴甫成, 吴君维, 王晓燕, 等. 湖南酸雨污染特征. *环境科学学报*, 2000, 20(6): 807 ~ 809.
- [14] 郑云有, 吴甫成. 长沙市酸雨污染研究. *湖南师范大学自然科学学报*, 2000, 23(1): 89 ~ 92.
- [15] 吕焕哲, 吴甫成. 湖南省主要城市大气环境质量状况分析. *云南地理环境研究*, 2003, 15(2): 78 ~ 82.
- [16] 张龚, 曾光明, 蒋益民, 等. 湖南省大气湿沉降化学研究. *中国环境监测*, 2003, 19(5): 7 ~ 11.
- [17] 熊美阳, 吕焕哲, 吴甫成. 湖南省大气污染特征与防治研究. *湖南师范大学自然科学学报*, 2003, 26(1): 89 ~ 92.
- [18] 郑红, 郑凯, 张桂华, 等. 哈尔滨冬季大气污染及逆温对污染物扩散影响. *自然灾害学报*, 2005, 14(4): 39 ~ 43.
- [19] 贺克斌, 余学春, 陆永祺, 等. 城市大气污染物来源特征. *城市环境与城市生态*, 2003, 16(6): 269 ~ 271.
- [20] 湖南省环境保护局. 2004 年湖南省环境状况公报. <http://www.hbj.hunan.gov.cn/WzDisplay.aspx?id=598>.
- [21] 于淑秋, 林学椿, 徐祥德. 北京市区大气污染的时空特征. *应用气象学报*, 2002, 13(Suppl.): 92 ~ 99.
- [22] 吴兆清, 刘国胜, 许国强, 等. 高斯模式在株洲市城区 SO₂ 分布规律研究中的应用. *湖南有色金属*, 2004, 20(2): 33 ~ 35.
- [23] 蒋益民, 曾光明, 张龚, 等. 湖南省 SO₂ 污染现状、排放强度地理分布及趋势预测. *湖南大学学报(自然科学版)*, 2004, 31(6): 75 ~ 79.
- [24] 张新玲, 安俊岭, 程新金, 等. 污染源、气象条件变化对我国 SO₂ 浓度硫沉降量分布的影响. *大气科学*, 2003, 27(5): 939 ~ 947.
- [25] 蒋高明. 植物硫含量法监测大气污染数量模型. *中国环境科学*, 1995, 15(3): 208 ~ 214.
- [26] 温达志, 孔国辉, 张德强, 等. 30 种园林植物对短期大气污染的生理生态反应. *植物生态学报*, 2003, 27(3): 311 ~ 317.
- [28] 蒋益民, 曾光明, 张龚, 等. 湖南韶山森林复合冠层沉降化学. *生态学杂志*, 2005, 24(2): 113 ~ 117.
- [30] 黄益江, 陈杜满, 刘玉明, 等. 二氧化硫污染对马尾松生长影响的相关研究. *浙江林学院学报*, 1998, 15(2): 127 ~ 130.
- [31] 孔国辉, 陆耀东, 刘世忠, 等. 大气污染对 38 种木本植物的伤害特征. *热带亚热带植物学报*, 2003, 11(4): 319 ~ 328.