

北京市大气中 CO 的浓度变化监测分析

薛敏^{1, 2}, 王跃思^{1*}, 孙扬^{1, 2}, 胡波^{1, 2}, 王明星¹

(1. 中国科学院大气物理研究所, 北京 100029; 2. 中国科学院研究生院, 北京, 100039)

摘要: CO 是城市大气中一种重要的污染物, 在城市和区域的光化学反应中起着重要的作用. 用装配氢火焰离子化检测器 (FID) 的 HP5890II 气相色谱 (GC) 方法, 以每 10min 的采样频率, 在北京中科院大气物理研究所 325m 气象环境观测铁塔上 (39°9' N, 116°4' E), 对北京城市大气 CO 浓度进行了连续监测, 时间为 2004-01~ 2004-12. 结果显示北京城市大气 CO 浓度日变化呈双峰型, 1d 之中出现 2 个高峰期, 早晨 07:00~ 08:00 和夜晚 22:00~ 23:00, 最高浓度值分别达到 $13.8\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$, $17.1\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$. 不同季节 CO 的日变化存在差异: 冬季、秋季的日变化幅度大, 而夏季、春季的日变化幅度小. 秋季、冬季早晨上班高峰期后 CO 浓度下降快, 春季、夏季上班高峰期后 CO 浓度下降慢. CO 的这种日变化是由地表排放源和气象条件共同决定的. 另外, CO 存在明显的季节变化, 总的表现为浓度最高值出现在冬季 12 月份 ($4.0\pm 3.4\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$), 浓度最低值出现在 5 月份 ($1.7\pm 0.7\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$). 整个观测期间 1a 的平均浓度为 ($2.6\pm 1.9\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$), 采暖期平均浓度为 ($3.5\pm 2.6\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$), 非采暖期平均浓度为 ($2.2\pm 1.2\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$).

关键词: CO; 氢火焰离子化检测器; 气相色谱; 日变化; 季变化

中图分类号: X511 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2006)02-0200-07

Measurement on the Atmospheric CO Concentration in Beijing

XUE Min^{1, 2}, WANG Yue-si¹, SUN Yang^{1, 2}, HU Bo^{1, 2}, WANG Ming-xing¹

(1. Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China; 2. Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract: Carbon monoxide is considered as a criteria pollutant in urban areas, and plays an important role in photochemistry of regional and urban environments. Continuous measurement of CO at the meteorological observation tower in IAP-CAS (39°9' N, 116°4' E) from January to December 2004 was carried out in Beijing, using HP5890II gas chromatography (GC) with flame ionization detector (FID), at measurement frequency of 10 minutes. The diurnal variations of the atmospheric CO concentration at the urban area in Beijing show a very clear cycle with two peaks, one appears about 07:00~ 08:00 in the morning and the other is at 22:00~ 23:00 in the evening, with the maximum of $13.8\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$, $17.1\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$, respectively. However, diurnal variations in four seasons are not very same. The variation range is bigger in winter and autumn seasons than that in summer and spring seasons. The concentration in fall and winter seasons dropped more quickly than that in spring and summer seasons after 07:00~ 08:00. CO concentration diurnal variations are believed to be due to the combination results of surface emission sources and meteorological factors. The results indicate that there is an obviously seasonal cycle of CO concentration, with the maximum in Dec ($4.0\pm 3.4\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$) and minimum in May ($1.7\pm 0.7\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$). The average concentration of CO during the whole year is ($2.6\pm 1.9\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$). The average concentration of CO during the heating period is ($3.5\pm 2.6\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$), and ($2.2\pm 1.2\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$) during the period without heating.

Key words: carbon monoxide; flame ionization detector; gas chromatography; diurnal variation; seasonal variation

CO 是大气对流层中重要的污染物^[1], 其体积分数已达到 10^{-6} 量级^[2]. 如果长时间处于高 CO 环境中, 在污染极为严重的城市大气中, 人的身体健康会受到直接威胁, 所以 CO 被美国 EPA 定为城市污染物的一个指标^[3]. 在对流层中, CO 是 OH 的直接汇^[4,5], 可消耗 50% 的 OH^[6], 从而影响对流层化学反应平衡和物质平衡; 在污染大气中, 当 NO_x 和碳氢化合物的浓度较高时, CO 可以通过光化学反应生成 O_3 , 形成二次污染. CO、 NO_x 、NMHC、 CH_4 的光化学反应过程是污染大气对流层中 O_3 增加的主要途径^[7]. CO 浓度的升高, 将加大大气中 OH 的消

耗, 减弱大气氧化能力, 从而影响其它可还原性物质的氧化. 据报道, 人类活动排放到大气中的 CO 间接导致大气中 CH_4 浓度增加大约占 24%~ 37%, 如果自然界 CO 排放量增加 1 倍, 相应对流层 CH_4 浓度将增加 40%~ 50%, O_3 浓度增加 12%^[8]. 人类活动排放到大气中的 CO 如果减少 20%, OH 在对流层中将增加 7%, 从而使得 CH_4 的增长速率降低, 同时

收稿日期: 2005-01-15; 修订日期: 2005-05-14

基金项目: 中国科学院知识创新工程重大项目 (KZCX1-SW-01); 国家自然科学基金项目 (40222202)

作者简介: 薛敏 (1976~) 女, 博士研究生, 研究方向为大气化学.

* 通讯联系人

也会降低对流层 O_3 和 HCFC, 减弱温室效应^[9]. 所以, 人类活动排放到大气中的 CO 气体也是导致气候变化的一种间接温室气体^[10, 11].

CO 的直接源主要是矿物质燃料不完全燃烧 (如汽车尾气, 工厂排放 350~ 550 Tg/a)、生物质燃烧 (300~ 700 Tg/a)、海洋 (20~ 200 Tg/a) 和植物排放 (60~ 160 Tg/a); 间接源有 CH_4 的氧化 (700 Tg/a) 和 NMHC 的氧化 (560 Tg/a)^[12]. 大气中 CO 的汇主要是通过 OH 自由基反应, 氧化生成 CO_2 , 从而从大气中清除; 另一个汇是土壤吸收^[13~ 16]. 此外, 对流层大气 CO 一小部分被输送到平流层, 被 OH 自由基氧化. 通过改变大气中氧化剂 OH 的浓度, CO 对大气中微量气体成分未来变化趋势起着十分重要的作用. 更好地了解 CO 的源汇问题, 才能更好的估算 CH_4 和含氢卤代烃等大气中其它微量气体的变化. 另外, 估算平流层 O_3 层的破坏程度也要依靠对 CO 源汇的认识. 因此, CO 的源汇测算和时空分布对全球预测有相当的重要性.

为了研究人类活动强烈影响城市大气 CO 浓度变化的规律, 及对区域和全球大气的影响, 中科院大气物理研究所自 2004-01 开始对北京大气 CO 浓度进行定位连续观测实验.

1 材料与方法

1.1 样品采集与数据处理

本系统在运行期间, 采样点设置在北京中科院大气物理研究所 325m 气象环境观测铁塔 (39°9' N, 116°4' E) 上 10m 处, 北京 325m 气象塔位于北京市正北的三环路和四环路之间, 距三环路约 1km, 气象塔的东面 200m 处为南北走向的京昌高速公路, 北面 50m 处为东西走向的北土城西路.

采样气路使用大气边界层物理与大气化学国家重点试验室的观测采样管线, 通过微机控制的无油真空、压力采样泵将采样点的大气样品导入气相色谱分析系统.

样品采集分析在 2004-01~ 2004-12 期间连续进行. 每 10min 采集 1 个空气样品进行分析, 在分析空气样品前后, 分别插入中国标准物质中心出产浓度为 2.1 mg/m^3 的 CO 标气. 用峰面积外标曲线法, 计算大气样品的 CO 浓度, 通过对采集频率为每 10min 1 个的样品数据进行平均, 求得 CO 的小时平均浓度. 日平均浓度是每日的各个小时浓度累加取平均, 以此类推, 月平均浓度是每月的日平均浓度累加取平均. 同一监测点有气象仪器可同时获得同期

的气象数据和辐射数据.

1.2 仪器装置

系统由装配氢火焰离子化检测器 (FID) 的 HP5890II 气相色谱 HP 化学工作站微机系统、时间序列控制器、1 套十通进样阀、1 套四通进样阀、1 套六通进样阀、4 套六位选择阀、2 套电磁三通阀、1 个 40L 高纯氮钢瓶气, 1 个 40L 高纯氢钢瓶气、由不同浓度标气组成的质量控制标气组合, 1 套空气采样泵, 1 套脱氧过滤器等组成. 经测试系统性能如下: 最大采样频率为 20 个/h, 进样量 1mL, 最低检测限 $17.3 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 精密性 < 2%, 准确度 < $\pm 3\%$, 仪器的灵敏度和稳定性完全满足大气 CO 测定的精确度.

2 结果与讨论

2.1 北京市大气 CO 浓度日变化

2.1.1 日变化的基本特征

图 1 是不同季节的平均日变化以及 2004 年所有数据的年平均日变化. 日变化为双峰型, 清晨和夜间浓度高, 白天午后浓度低. 这与兰州市监测的 1989 年 12 月份的 CO 平均日变化的双峰型一样^[17]. 4 个季节 CO 浓度都在早晨 07:00~ 08:00 出现 1 个峰值, 日出后下降, 至午后 15:00~ 16:00 达到最低值后接着上升, 到夜间 22:00~ 23:00 再次出现 1 个峰值. 07:00~ 08:00 出现的浓度值可达 $13.8 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$, 这显然与上班高峰有关, 此外, 在午夜 22:00~ 23:00 出现的另一个浓度值可达 $17.1 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$, 是由于此时京昌高速公路上高吨位柴油车的排放造成的, 夜间混合层高度和大气边界层稳定状态使局地地表源排放的 CO 在低层大气中积累, 导致夜间的浓度峰值有时高出白天上班高峰的浓度峰值.

2.1.2 日变化的季节差异性

CO 的日变化在不同季节不尽相同. 春季、夏季、秋季和冬季 CO 浓度的变化幅度分别为 0.8、0.6、2.0 和 $1.6 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$. 冬季和秋季的日变化幅度比较大, 对应的冬季和秋季的平均浓度的标准偏差也比较大; 而夏季和春季的日变化幅度小, 对应的标准偏差也比较小. 春季、夏季、秋季日变化的最低值比较接近, 秋季日变化幅度大的原因是最高值相差较大. 进一步比较, 发现 3 个季节在早上的峰值差别也不大, 造成秋季日变化幅度大的原因主要是午后 17:00 到午夜 CO 浓度持续增加, 在 22:00~ 23:00 出现了高于白天的浓度峰值. 冬季由于采暖燃煤, 使得最低值, 最高值浓度均远高于其它 3 个季节. 全年

的浓度的变化幅度为 $1.2 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$. 从图 1 还可以看出, 秋季、冬季早晨上班高峰期后 CO 浓度下降得快, 春季、夏季上班高峰期后 CO 浓度的下降得慢.

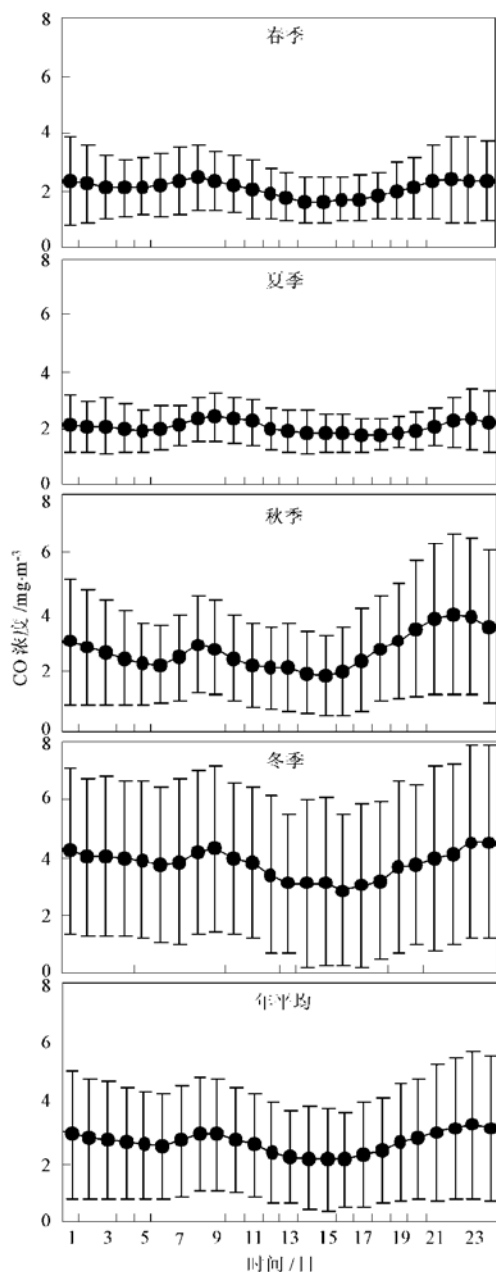


图 1 CO 浓度的日变化

Fig. 1 Diurnal variation of CO

2.1.3 日变化与气象因素的关系

为了讨论北京大气中 CO 浓度日变化和气象因子的关系, 以晴天和阴雨天的观测数据作比较.

在晴天天气条件下, 选取 07-01~07-08(夏季), 11-11~11-21 日(秋季). 图 2 是对应的 CO 浓度变化曲线. 从图 2 可以看出: 浓度高值多出现在夜晚, 白天时段 08:00 点过后, 浓度降低的趋势在夏季和

秋季都是很明显的.

采样点位于北京市北部, 向北接近北京郊区, 向南、东则主要是城区, 风向的不同可以反应出不同来源气团的影响. 根据观测资料作不同风向的平均, 得到图 3、图 4. 从图 3(a) 看出: 夏季晴天白天, 浓度高值区出现在南风, 西南风向上, 其他风向上差异不大; 夜间[图 3(b)] 南风、东南风向上浓度值偏小, 其他几个风向上浓度差不多. 这反映了城区排放的污染源对测点的影响, 结合风速随风向的分布, 还可以看出在风速较高的风向上, 浓度较低. 11 月秋季晴天白天[图 4(a)], 浓度高值区出现在东南、西南、东风方向; 夜间[图 4(b)], 浓度高值区出现在南风、东南风、东北风向上. 11 月份晴天白天各个风向上的风速都大于晚上, 夜间浓度明显大于白天, 这还和秋季混合层高度低, 大气稳定度状态不利于 CO 扩散有关.

另外讨论夏季阴雨天 CO 的日变化(06-21~06-30), 见图 5. 从图 5 看出, 阴雨天的日变化趋势较之晴天不明显. 白天[图 6(a)] 各个风向上的风速比较接近, 浓度在各个风向上差异不大; 夜间[图 6(b)] 南风、东北风向上浓度值偏大, 西北风向上浓度最低, 对应的风向上风速比较大. 白天和夜间的盛行风向比较一致, 盛行风向上的平均风速白天为 4.5 m/s , 夜间为 4 m/s .

CO 的日变化是由地面排放源, 大气传输(水平, 垂直), 以及大气边界层的日变化共同影响的. 北京市大气中 CO 主要来自汽车尾气的排放. 夏季的日变化在晴天时还是比较明显的, 阴雨天趋势就不明显. 图 1 中夏季平均的日变化并不明显, 这可能和 2004 年夏季(6~8 月) 北京地区的天气气候特点有关: 2004 年气温接近常年稍偏低, 日照偏少. 季内, 初夏和盛夏降水偏多, 晚夏 8 月降水偏少. 季内本市大部分测站的极端最高气温在 $37 \sim 40^\circ\text{C}$ 之间, 均出现在 6 月 11 日. 季内高温日数(即日最高气温 $\geq 35^\circ\text{C}$ 的天数) 明显少于常年, 且连续高温日数也明显少于常年.

2.2 北京市大气 CO 浓度季变化

2.2.1 季变化的基本特征

表 1 是 2004 年北京大气 CO 的 12 个月的月平均浓度和年平均浓度, 括号里是小时统计总数. CO 存在明显的季节变化, 总的表现为浓度最高值出现在冬季 12 月份, 浓度最低值出现在 5 月份(图 7). 计算结果表明春季(3, 4, 5 月)、夏季(6, 7, 8 月)、秋季(9, 10, 11 月)和冬季(12, 1, 2 月)的浓度平均值分

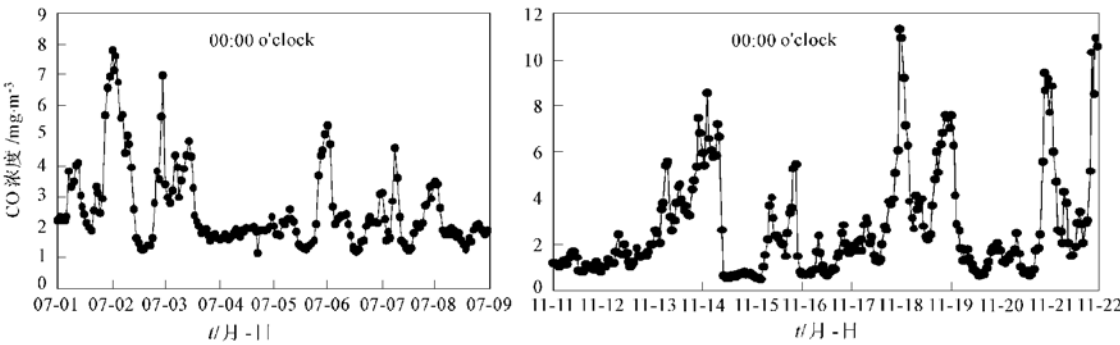


图 2 CO 浓度变化曲线

Fig. 2 Variation of CO concentration

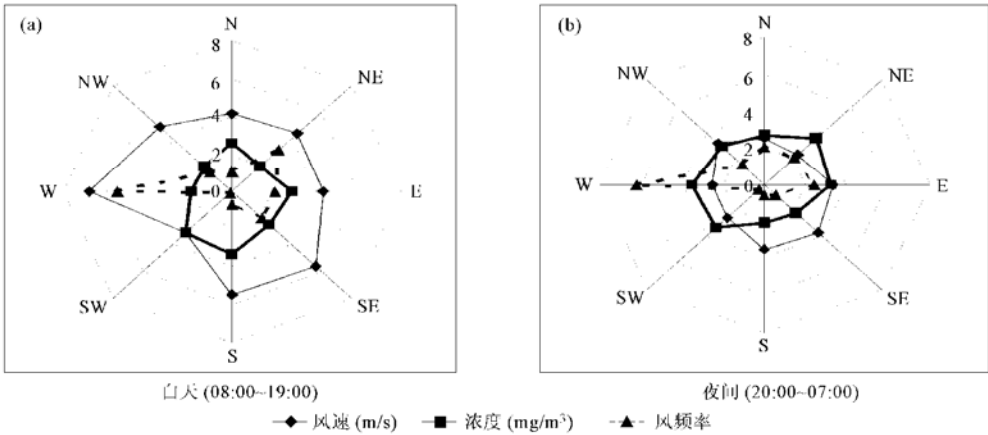


图 3 CO 浓度、风速随风向的变化(07-01~07-08)

Fig. 3 CO concentration and wind speed variation based on wind direction

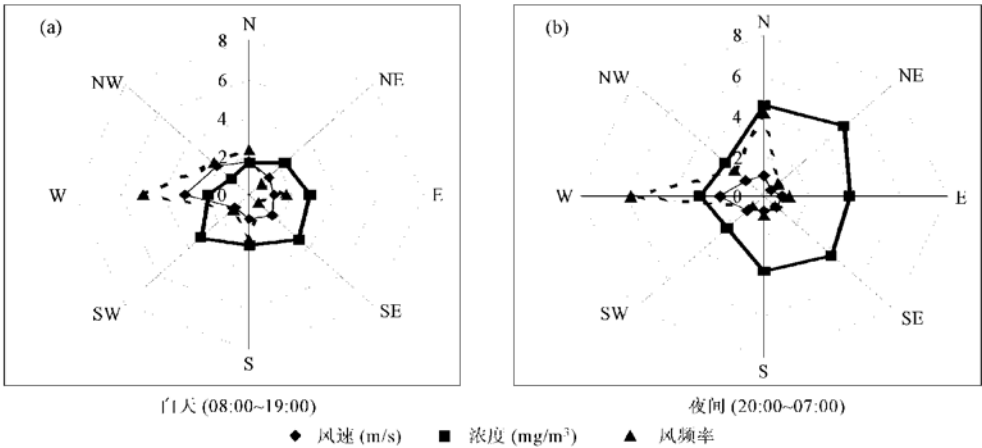


图 4 CO 浓度、风速随风向的变化(11-11~11-21)

Fig. 4 CO concentration and wind speed variation based on wind direction

别为 $(2.1 \pm 1.2) \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$, $(2.1 \pm 0.8) \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$, $(2.8 \pm 1.8) \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$, $(3.8 \pm 2.9) \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$. 采暖期 (11-10~03-15) 平均浓度: $(3.5 \pm 2.6) \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$, 非采暖期 (03-16~11-10) 平均浓度为 (2.2 ± 1.2)

$\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$. 整个监测期间 1a 的平均浓度为 $(2.6 \pm 1.9) \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$.

导致 CO 在北京大气中浓度季变化的因素, 首先是排放源的变化, 其次是季节性气候变化以及光

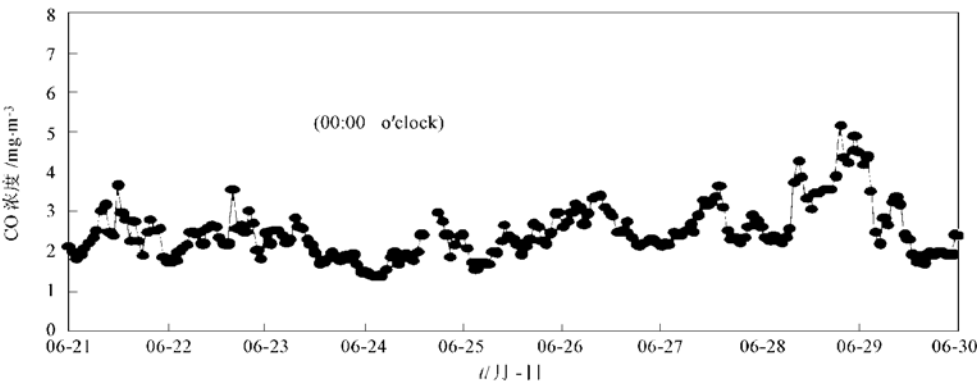


图 5 CO 浓度变化曲线
Fig. 5 Variation of CO concentration

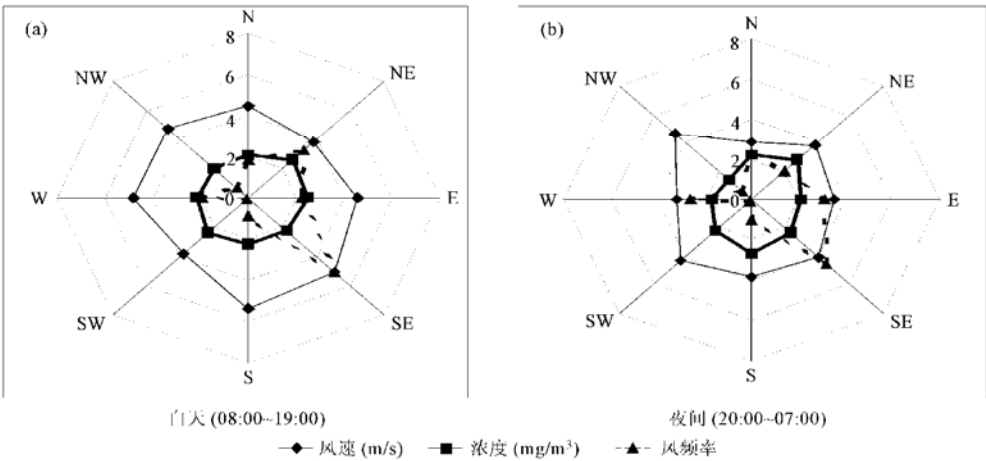


图 6 CO 浓度、风速随风向的变化(06-21~ 06-30)
Fig. 6 CO concentration and wind speed variation based on wind direction

化学反应. 冬季由于北京采暖, 使得采暖期平均浓度远高出非采暖期, 采暖期平均浓度是非采暖期的 1.6 倍. 国内其他城市例如沈阳市市府大街 1985 年调查表明, CO 在冬季采暖期的平均浓度是夏季非采暖期的 2 倍^[18]. 冬季大气稳定度升高, 使 CO 扩散能力降低也是冬季 CO 浓度高的一个原因. 另外, 冬季温度降低, 辐射减弱, 光化学反应减弱, 使得作为 CO 汇的 OH 的浓度降低, CO 浓度有个积累过程, 从而浓度升高. 日本于 1996 年~ 1997 年在 Oki (36° N, 133° E), Happo (36° N, 137° E), Benoki (26° N, 128° E) 3 个地面清洁站 CO 的连续监测^[19] 都表明 CO 浓度最低值出现在 7 月, 而本文浓度最低值出现在 5 月, 这说明城市和清洁站的季节变化不同. 北京大气 CO 浓度 6 月份开始升高, 7 月份持续升高, 8 月份又有所下降到与 6 月份接近, 之后, 进入秋季, 温度降低, 光化学反应减弱, CO 浓度又开始缓慢升高.

表 1 CO 的浓度月平均值	
Table 1 Monthly average values of CO	
月份	Mean $\pm$ 1 s. d. (total hours) / $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$
Jan	3.8 $\pm$ 1.8 (314)
Feb	3.4 $\pm$ 2.4 (508)
Mar	2.6 $\pm$ 1.3 (673)
Apr	1.8 $\pm$ 0.7 (474)
May	1.7 $\pm$ 0.7 (566)
June	1.9 $\pm$ 0.7 (647)
July	2.4 $\pm$ 1.0 (418)
Aug	1.9 $\pm$ 0.6 (568)
Sep	2.3 $\pm$ 1.2 (628)
Oct	3.0 $\pm$ 1.8 (589)
Nov	2.9 $\pm$ 2.2 (556)
Dec	4.0 $\pm$ 3.4 (733)
Mean	2.6 $\pm$ 1.9

2.2.2 季变化与辐射的关系
为了进一步分析, 将 5、6、7、8 月份的 CO 浓度

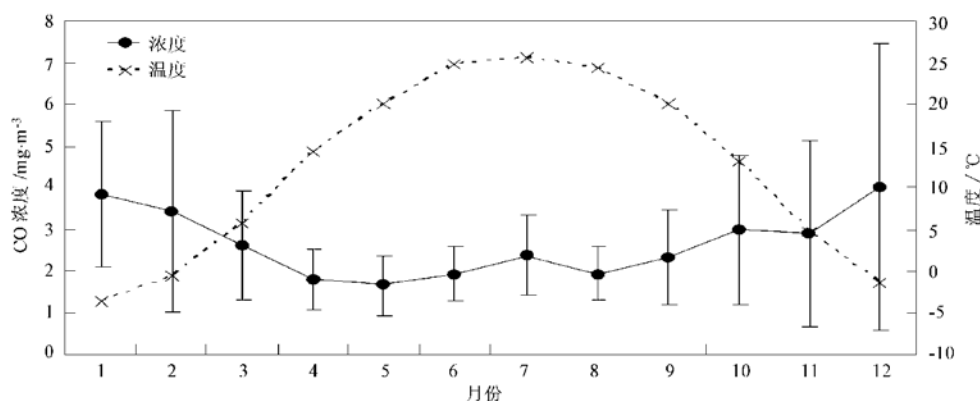
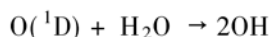
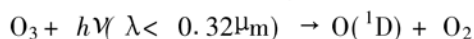


图 7 CO 浓度的月变化趋势

Fig. 7 Lunar variation of CO

分白天(06:00~18:00), 夜晚(19:00~05:00) 2 个时段单独讨论. 白天考虑光化学反应消耗 CO, 夜间考虑气象因子对 CO 的影响. 对流层 OH 通过下列反应($\lambda < 0.32\mu\text{m}$ 为紫外辐射):



分析紫外辐射和白天时段 CO 浓度的同期数据发现, 他们二者呈线性反相关($r = -0.578$, $\alpha = 0.01$, $n = 59$). 随着温度的升高, 紫外辐射增强, 在 5 月份紫外辐射达到上述 4 个月的最强, 使得 OH 增多, CO 被消耗的多. 6 月和 8 月紫外辐射没有显著差异, 5 月和 7 月紫外辐射没有显著差异. 而 7 月份的紫外辐射分别是 6、8 月的 1.3 和 1.6 倍 ($p = 0.10$, $p = 0.01$). 6 月和 8 月的 CO 浓度无显著差异, 而 7 月份浓度是 5 月份的 1.4 倍 ($p < 0.01$). 分别分析白天和夜晚时段的数据, 发现 7 月份白天是 5 月份白天的 1.43 倍 ($p < 0.01$), 7 月份夜间是 5 月份夜间的 1.36 倍 ($p < 0.01$). 白天浓度高的原因可能是因为非甲烷烃, 以及甲烷浓度的峰值出现在夏季^[20, 21], 这类有机物和 OH 自由基的光化学反应使得大气中与 CO 发生光化学反应的 OH 汇减少, CO 光化学反应消耗减少; 另一方面, 这类有机物的氧化反应又间接生成 CO^[22], 使得 CO 的浓度升高. 夜间浓度高, 可能是因为 7 月份出现逆温层多, 不利于污染物的扩散, 扩散汇减弱, 使得排放出来的 CO 积累在地面层, 浓度升高. 7 月份由于仪器问题, 数据缺测的比较多, 所得的数据比其他的几个月少(1 月份除外), 所以导致 7 月份 CO 浓度高的原因还有待继续的实验, 和下一年的数据进行比对, 以发现进一步的规律.

3 结论

(1) 北京市大气 CO 日变化呈双峰型, 高峰值出现在早晨 07:00~08:00 和夜晚 22:00~23:00 的 2 个时段, 这主要是由排放源决定的.

(2) 不同季节的 CO 日变化不尽相同, 总的来说, 冬季、秋季, 日变化幅度大, 而夏季、春季日变化幅度小. 秋季、冬季早晨上班高峰期后 CO 浓度下降快, 春季、夏季上班高峰期后 CO 浓度下降慢.

(3) 晴天时, 早上高峰期后 CO 浓度下降趋势明显, 阴雨天时日变化不明显. CO 的浓度与风速风向密切相关.

(4) 北京城市大气 CO 浓度最大值出现在 12 月份, 最小值出现在 5 月份. 这主要是由排放源的变化, 其次是季节性气候变化以及光化学反应共同决定的.

致谢: 感谢张文研究员在实验期间给予的帮助和吉东升硕士在实验数据处理方面所做的部分工作.

参考文献:

- [1] Derel Elsom, Smog Alert. Managing Urban Air Quality[M]. London: Earthscan Publications Ltd., 1996. 225.
- [2] 刘小红, 洪钟祥, 李家伦, 等. 北京市气象塔秋季大气 O₃, NO_x 及 CO 浓度变化的观测实验[J]. 自然科学进展, 2000, 10 (4): 338~342.
- [3] US Environmental Protection Agency. Air quality criteria for carbon monoxide, Rep. EPA/600/8-90/045F, Office of Health and Environmental Assessment, Environmental Criteria and Assessment Office. Research Triangle Park, NC, Available from: NTIS, Springfield, VA, 1991. PB93-167492.
- [4] Levy H. II Normal atmosphere: Large radical and formaldehyde concentrations predicted[J]. Science, 1971, 173: 141~143.

- [5] Khalil MAK, Rasmussen R A. The global cycle of carbon monoxide: trends and mass balance[J]. Chemosphere, 1990, **20**: 227~ 242.
- [6] Lawrence MG. Photochemistry in the tropical Pacific troposphere: Studies with a global 3-D chemistry-meteorology model[D]. Atlanta: Georgia Tech, 1997.
- [7] McKeen S A, Hsie E Y, Liu S C. A study of the dependence of rural ozone precursors in the eastern United States[J]. J. Geophys. Res., 1991, **96** (D8): 15377~ 15394.
- [8] Ramanathan V, *et al.* Climate chemical interactions and effects of changing atmospheric trace gases[J]. Rev. Geophys., 1987, **25** (7): 1442~ 1482.
- [9] Bruhl Ch, Crutzen P J. Reductions in the anthropogenic emissions of CO and their effect on CH₄[J]. Chemosphere: Global Change Sci, 1999, **1**: 249~ 254.
- [10] IPCC. Climate Change: The IPCC Scientific Assessment, Intergovernmental Panel on Climate Change[M]. Cambridge: Cambridge Univ. Press, 1990.
- [11] Khalil M A K, Rasmussen R A. Causes on increasing atmospheric methane: depletion of hydroxyl radicals and the rise of emissions[J]. Atmos. Environ., 1985, **19**: 397~ 407.
- [12] Maria Kanakidou, Paul J Crutzen. The Photochemical source of carbon monoxide: Importance, uncertainties and feedbacks[J]. Chemosphere: Global Change Sci., 1999, **1**: 91~ 109.
- [13] Ingersoll R B, Inman R E, Fisher W R. Soil's potential as a sink for atmospheric carbon monoxide[J]. Tellus, 1974, **26**: 151~ 159.
- [14] Heichel G H. Removal of carbon monoxide by field and forest soils[J]. J. Environ. Quality, 1973, **2**: 419~ 423.
- [15] 董云社, 彭公炳. 温带森林土壤消耗大气 CO 总量及影响因素研究[J]. 气候与环境研究, 1997, **2** (1): 72~ 76.
- [16] Gary M King. Characteristics and significance of atmospheric carbon monoxide consumption by soils[J]. Chemosphere: Global Change Sci., 1999, **1**: 54~ 63.
- [17] 奚晓霞, 宋庆海, 黄建国, 等. 兰州市冬半年大气污染物分布特征及其变化规律[J]. 兰州大学学报, 1995, **31** (3): 136~ 140.
- [18] 周洪昌. 城市汽车排放 CO 污染模式的概略分析[J]. 环境科学, 1994, **15** (5): 78~ 82.
- [19] Daiju Narita, Pakpong Pochanart, Jun Matsumoto, *et al.* Seasonal variation of carbon monoxide at remote sites in Japan [J]. Chemosphere: Global Change Science, 1999, **1**: 137~ 144.
- [20] 徐新, 王跃思, 刘广仁, 等. 北京大气中 BTEX 的观测分析与研究[J]. 环境科学, 2004, **25** (3): 14~ 18.
- [21] 刘强, 王跃思, 王明星. 北京地区大气主要温室气体的季节变化[J]. 地球科学进展, **19** (5): 817~ 82.
- [22] 王明星, 大气化学[M]. 北京: 气象出版社, 1999. 121~ 125.