

Yunnan Plateau City Ozone Pollution Characteristics and Cause of Formation Analysis

Zhengyuan Ji, Lin Yang, Jing Zhang

Yuxi City Institute of Environmental Science, Yuxi Yunnan
Email: jizy1225@126.com, borton@126.com, yxaamc@163.com

Received: Nov. 23rd, 2017; accepted: Dec. 4th, 2017; published: Dec. 14th, 2017

Abstract

By selecting data from automatic air monitoring stations located in 5 cities of Yunan Province, this paper has studied characteristics and patterns of change of pollution of ozone concentration, and analyzed the correlation among such climatic conditions as ozone concentration, nitrogen oxides concentration, temperature, humidity and wind velocity. The outcome shows that spring time sees high ozone concentration and ozone concentration correlates closely with nitrogen oxides concentration, temperature, humidity and wind velocity. By examining major pollutant emission and sources of atmosphere pollutant in Yuxi City, the paper attempts to detect causality of ozone pollution in Yunnan Province and offer several suggestions addressing the issue.

Keywords

Yunnan Plateau City, Ozone, Pollution, Causality, Suggestions

云南高原城市臭氧污染特征及成因分析

吉正元, 杨 林, 张 晶

玉溪市环境科学研究所, 云南 玉溪
Email: jizy1225@126.com, borton@126.com, yxaamc@163.com

收稿日期: 2017年11月23日; 录用日期: 2017年12月4日; 发布日期: 2017年12月14日

摘 要

本文选取了云南省内五个城市的环境空气自动监测站2015年和2016年的监测数据, 研究了高原城市臭氧浓度的污染特征及变化规律, 分析了臭氧浓度与氮氧化物浓度及温湿度、风速这些气象条件的其相关

性。结果表明,在臭氧浓度春季较高,且臭氧浓度变化与氮氧化物浓度及温度、湿度、风速这些气象条件有较好的相关性。结合云南省主要的污染物排放情况和玉溪市大气污染物源解析的结果,尝试分析了云南省臭氧污染形成的原因,并提出了控制臭氧污染的一些建议。

关键词

云南高原城市, 臭氧, 污染, 成因, 建议

Copyright © 2018 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

在云南省内,除昆明等少数几个城市以外的其他城市 O₃ 监测普遍起步较晚。从 2014 年逐步开始执行空气质量新标(GB3095-2012)后,地州一级的城市方才正式开展了城市区域 O₃ 浓度的监测。经过 2 到 3 年的努力,初步积累了一些高原城市的 O₃ 监测数据,经过分析发现:云南高原城市的空气质量总体较好,但是仍然会出现 O₃ 浓度超标的情况, O₃ 不时成为影响地区环境空气质量的首要污染物;成为继 PM_{2.5} 之后,影响地区空气质量的又一个重要因素。尤其是 2015 年以来,有的城市 O₃ 日最大 8 小时平均浓度超过 100 μg/m³ 的天数增多,引起了社会的关注。因此研究 O₃ 污染特征已十分必要。当然,要系统、深入地对高原城市的 O₃ 进行研究,尚需补充大量的基础工作和更长时间的各种检测数据。囿于时间和客观条件的限制,本文尝试通过对近两年的积累的一些监测数据进行统计、比较,对云南高原城市的 O₃ 污染现状、污染特征及影响因素进行初步的分析和探讨,并对 O₃ 污染的控制提出一些建议。

2. 数据采集和处理

2.1. 基本思路和区域选择

目前,云南省内的 O₃ 监测点位基本都布设于城市区域,客观上受获取资料、数据的条件限制,本次研究并没有把云南省内所有进行 O₃ 监测的高原城市都作为研究的对象,而是选取了云南省重要区域具有代表性的五个城市进行研究。此次研究并不仅仅局限于单个城市的分析,更注重把云南省内具有代表性的五个城市的监测数据放在一起做比较分析,以期寻找 O₃ 污染在跨城市区域尺度上的一些特征。考虑到云南省域群山延绵、沟壑纵横的地形地貌特征,研究区域选定了滇西北、滇西、滇中和滇南四个区域。在这四个区域中选取的五个城市是沿滇西纵谷地带分布的具有代表性的高原城市,分别是:滇西北高地的丽江、滇西山地的保山、滇南谷地的景洪和滇中坝区的昆明、玉溪。这样的选择,一方面是因为这一块区域线路是季风沿途影响的重要地区;二是它们涵盖了河谷、坝区、山地等具有代表云南省域复杂地形特征的区域;其三,这五个城市具有至少两年的完整的 O₃ 监测数据。

本次研究选取的五个城市中,丽江、昆明、玉溪和景洪四个城市在地理上连成的一条折线将云南省域内东西两块地形地势特征差异显著的区域大致划分开来:中东部是起伏相对和缓的低山、丘陵以及星罗棋布的坝区,西部为高差大、地势险峻、高山峡谷相间的横断山脉纵谷区。另外,五个城市所处的海拔呈阶梯分布,丽江最高(约 2400 m),保山、昆明和玉溪次之(约 1600 m),景洪最低(约 600 m)。这样,所选择的五个城市基本代表了省内不同地形地势条件的区域;在地理上,东西南北都覆盖到了。如图 1。

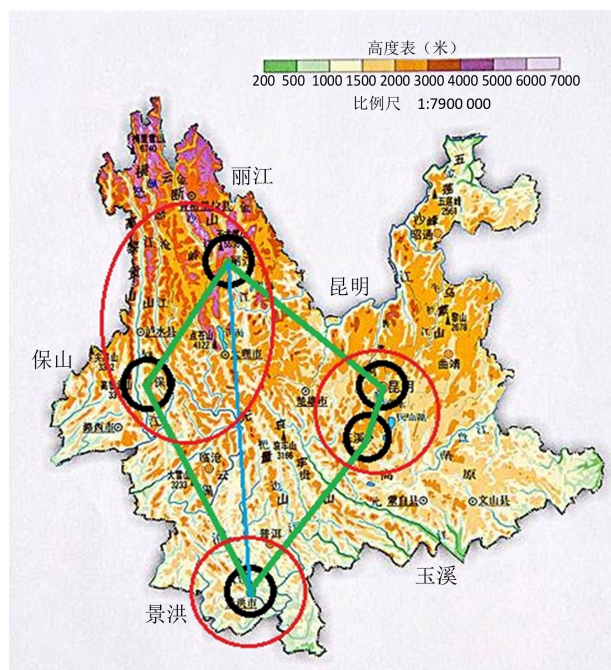


Figure 1. Sketch map of five cities location in Yunnan Province
图 1. 五个城市在云南省的位置示意图

2.2. 数据采集和分析

研究选取丽江、昆明、玉溪、保山和景洪五个城市共 17 个监测子站连续两年的自动监测数据。对各个城市站点的日均值按照全年的时序变化情况进行比照分析，重点关注 NO_x 的同期变化情况，同时考量温度、湿度、风速、日照强度等气象条件的影响。小时浓度值用玉溪市三个站点(东风水库、玉溪一中和文体中心)进行研究。并对各类基础数据进行统计，对其进行相关性分析和比较分析，以寻找影响近地面 O_3 浓度变化的原因。

3. 结果与讨论

3.1. 特征分析

3.1.1. 基本状况

研究选取的五个城市中，虽然有的城市子站存在日最大 8 h 平均值浓度出现超标的情况，但 O_3 浓度总体上都不属于高浓度范围。五个城市日最大 8 h 平均值浓度在 $30\sim 140 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 的范围内波动，浓度波动范围大。在一年当中，高浓度时段出现在春季。滇中坝区两个临近城市昆明、玉溪的 O_3 浓度变化趋势和规律具有明显的共性，且各有特点；而海拔不同，地形条件有显著差异的两个城市昆明、保山又在 O_3 的高浓度值分布规律上有具有相似性。南北相峙的丽江和景洪，一个在高海拔的高山平甸，一个在低海拔的河谷地带， O_3 浓度季节变化差异显著。

3.1.2. 污染区域特征

2015 年和 2016 年云南省五个城市的 O_3 年均浓度值总体不高，滇中三个城市保山、昆明、玉溪 2016 年较 2015 年有所升高；西北部的丽江和南部的景洪 2016 年较 2015 年浓度值有所降低，西北部略低于中部地区，而高于南部地区，中部地区较其他地区略高。见图 2。

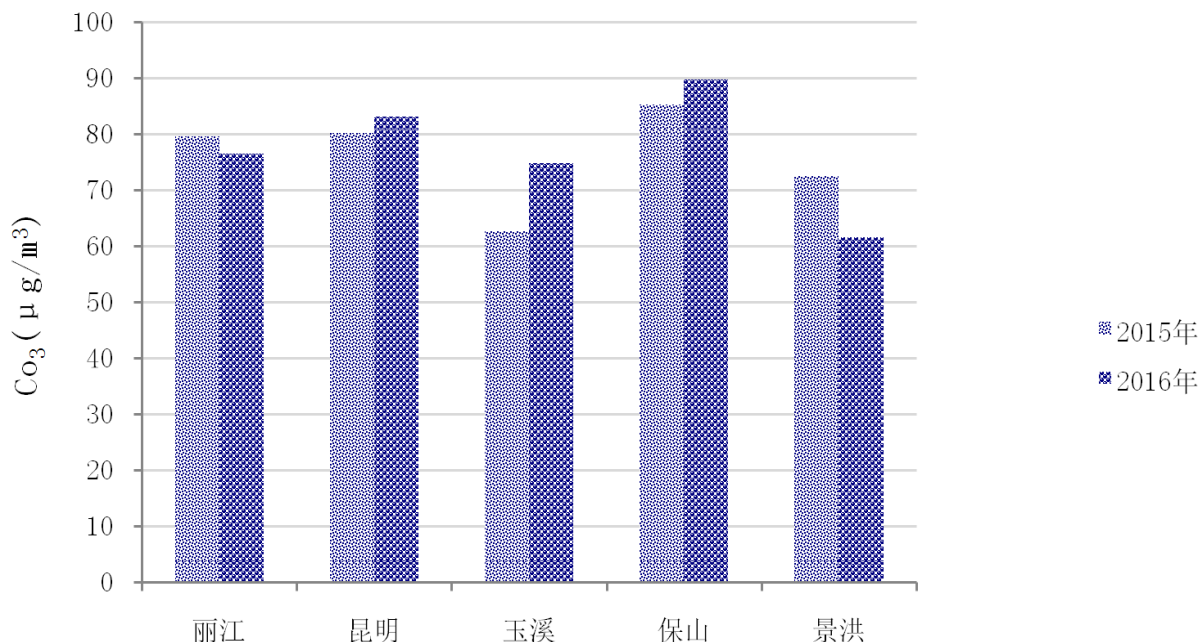


Figure 2. In 2015-2016, comparison of ozone annual mean concentration in five cities

图 2. 2015~2016 年五城市 O₃ 年平均浓度比较

3.1.3. 污染时间特征

(1) 季节变化特征

从五个城市 2015 年和 2016 年的统计数据来看, O₃ 浓度变化具有季节特征: 总体上, 春季的浓度高于夏秋冬的浓度。

其中, 景洪和保山的 O₃ 浓度季节差异显著, 保山和景洪的春季 O₃ 浓度明显高于其他季节, 且突破了 100 mg/m³ 的浓度值; 夏秋两季的浓度值较低。两个城市的 O₃ 浓度 2016 年较 2015 年各个季节的浓度均有所下降。其他三个城市的春季 O₃ 浓度略高于其他季节。如图 3。

玉溪与昆明在地理位置上相距较近, 地形条件相似, 其 O₃ 浓度的季节变化规律基本一致; 区别是昆明的 O₃ 浓度季节变化幅度高于玉溪, 玉溪的 O₃ 浓度四季变化较昆明要小得多。图 3 中以柱状显示的 O₃ 浓度递减比较缓慢, 说明其季节浓度差异较小, 波动不大; 若合并其他五项空气质量指标, 总体上, 玉溪的空气质量亦优于昆明。两个城市的 O₃ 浓度季节差异 2016 年较 2015 年有增大的趋势, 其中昆明比较突出, 2016 年春季的 O₃ 浓度值突破 100 μg/m³。

丽江的 O₃ 浓度季节变化也比较小, 但其 O₃ 浓度的低值出现在夏季(2016 年)和秋季(2015 年)。其 O₃ 浓度 2016 年较 2015 年没有发生明显变化, 都处在一个较低的浓度区间。

(2) 月份变化特征

考察五个城市连续两年的 O₃ 浓度月份变化情况, 其总体变化具有共性, 即年初高, 年末低。这一特征连续两年重复出现。一年中, O₃ 浓度峰值集中出现在 3 月和 4 月间(昆明和玉溪在 4、5 月间出现峰值), 低浓度值则多出现在 8 月和 10 月间。见图 4。

五个城市的 O₃ 月平均浓度变化还有地域上的相似性。五个城市从地域分布上大致可以划分为滇西山地区城市保山和丽江, 滇中坝区城市昆明和玉溪以及滇南河谷城市景洪。从城市近两年的 O₃ 月平均浓度变化的曲线可以看出, 滇西、滇中和滇南的城市浓度变化各有特点, 处于相近区域位置的城市 O₃ 月平均浓度变化的趋势和规律是非常相似的, 其变化规律趋同。见图 5。

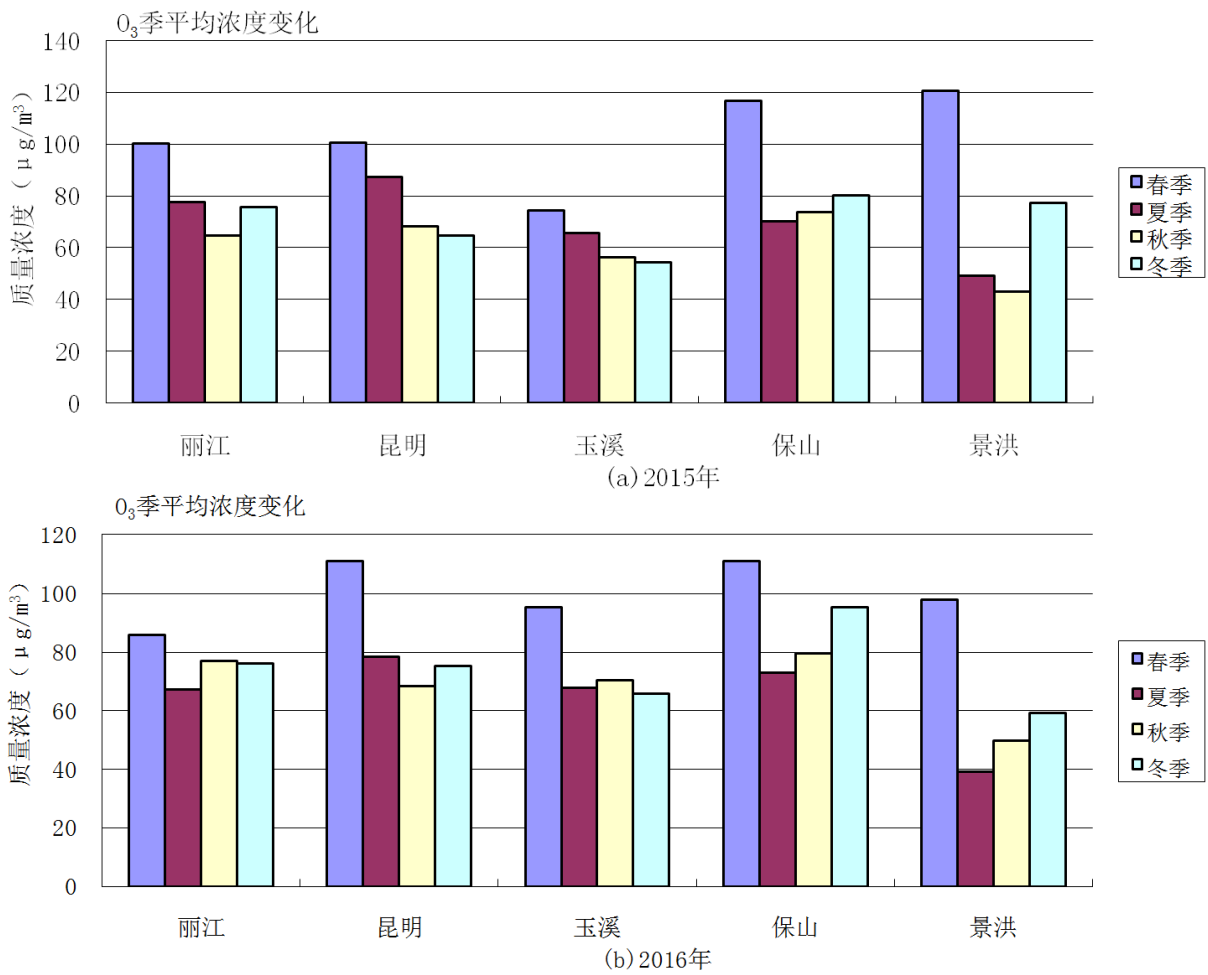


Figure 3. In 2015-2016, variation characteristics of ozone quarterly average concentration in five cities

图 3. 2015~2016 年五个城市 O₃ 季平均浓度变化特征

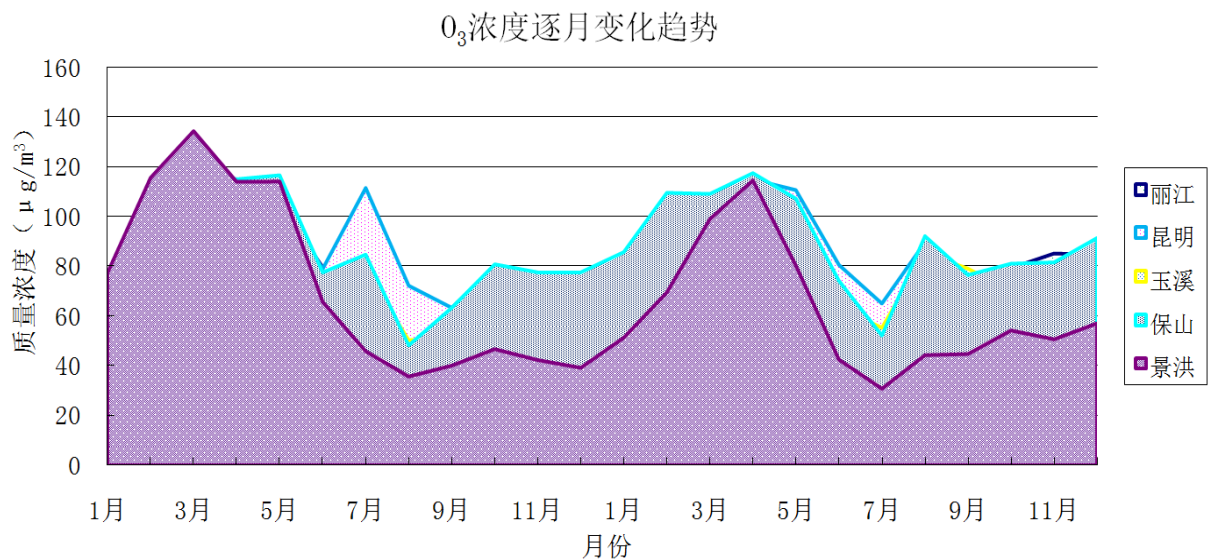


Figure 4. In 2015-2016, monthly variation trends of ozone concentration in five cities

图 4. 2015~2016 年五城市 O₃ 浓度逐月变化趋势

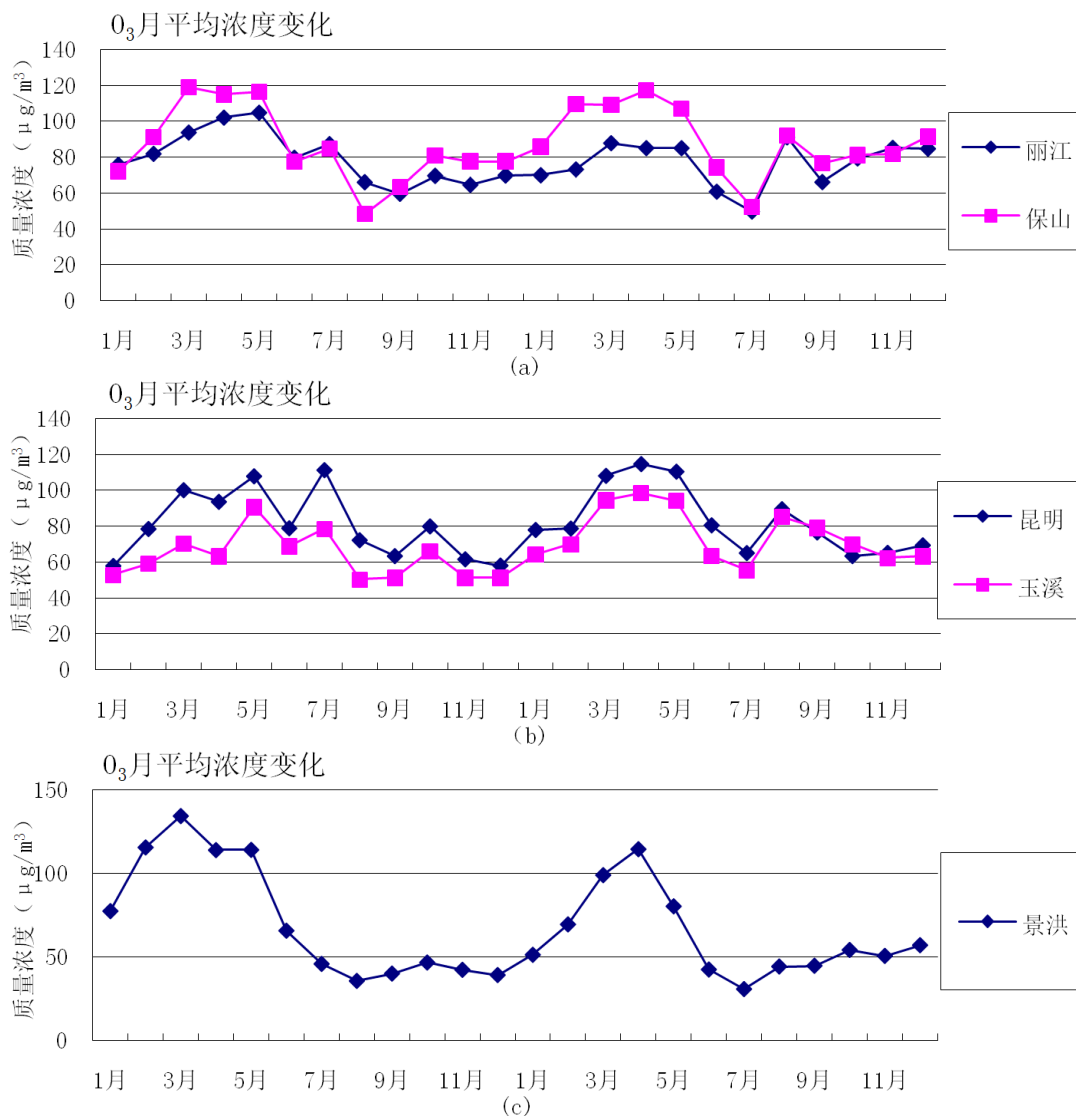


Figure 5. In 2015-2016, variation characteristics of ozone monthly average concentration in five cities
图 5. 2015~2016 年五城市 O₃ 月平均浓度变化特征

(3) O₃ 高浓度季节的 1 小时平均浓度变化特征

春季是五个高原城市的 O₃ 浓度最高的季节, 本文采用玉溪市三个子站 2015 年 5 月 7 日和 2016 年 5 月 10 日的监测结果分析小时浓度变化规律。见图 6。

玉溪市城区三个站点 5 月份的小时浓度变化规律相似。从 0:00 开始浓度逐渐降低, 至 6:00~7:00 左右达到最低点后开始反转, 浓度逐渐升高, 至 14:00~15:00 间达到最高值后再次反转, 然后逐渐下降。次日重新开始近似此规律的浓度变化。参见图 6。

3.1.4. O₃ 浓度变化趋势分析

统计五个城市 2015 年和 2016 年 O₃ 浓度日最大 8 小时平均浓度达到二级天数的情况, 将两年的二级天数做比较分析。如图 7。

2015 年~2016 年, 昆明、玉溪和保山的 O₃ 浓度达二级的天数增加, 其中昆明增加 40 天, 增幅 57.1%; 玉溪增加 38 天, 增幅 146.2%; 保山增加 12 天, 增幅 9.9%。其他站点均呈下降趋势, 为负增长, 其中丽

江减少 20 天, 缩减-35.7%; 景洪减少 51 天, 缩减 50.0%。以上数据表明, 滇中纬度带, O_3 污染呈上升趋势; 滇西北维持在比较好的状况; 滇南城市 O_3 污染呈下降趋势。如表 1。

3.1.5. O_3 浓度变化与 NO_x 相关性分析

取玉溪市文体中心站点 2015 年和 2016 年 O_3 浓度较高的 5 月份来看, 从 5 月份 O_3 小时浓度与 NO_x 小时浓度变化的情况考察, 可以看出: O_3 和 NO_x 浓度成比较明显的负相关; 变化规律有共性: 在一天内, 随着时间的推移, 昼夜的转换, 太阳辐射由弱到强, 而后又由强转弱, 从而影响大气光化学反应在早晨和夜晚比较微弱而午后比较活跃, 由此导致大气中 O_3 浓度在午后迅速升高并达到峰值, 相反地 NO_x 浓度在午后达到最低值; 傍晚以后, 太阳辐射减弱, NO_x 不断累积并消耗 O_3 , O_3 浓度在夜间不断降低, 在次日太阳辐射能量开始迅速攀升的 12:00 以前达到最低值, 而 NO_x 则在夜间不断积累, 在次日太阳辐射能量激活光化学反应开始以前达到最高值。如图 8。

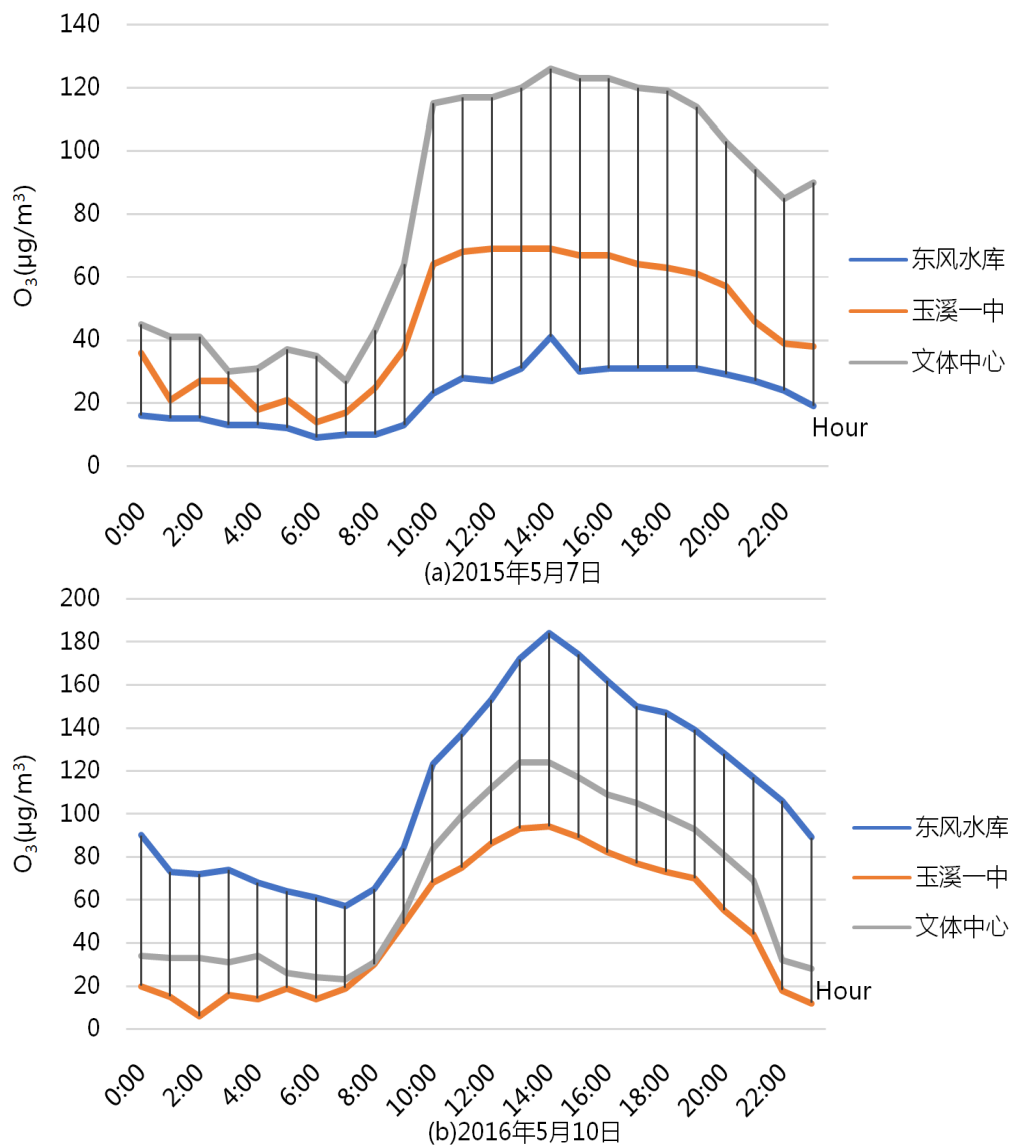


Figure 6. In 2015-2016, 1-hour average concentration variations of three ambient air automatic monitoring substations in central urban area of Yuxi in ozone high concentration season

图 6. 2015~2016 年玉溪市中心城区三个空气自动监测子站在 O_3 高浓度季节的 1 小时平均浓度变化

3.1.6. O₃ 浓度变化与气象因素相关性分析

制约近地面 O₃ 浓度的因素有很多,其中气象条件直接影响大气中的光化学反应和 O₃ 的输送和扩散,从而影响 O₃ 浓度,此次选取了玉溪市 2016 年 3 月份,即春季大风季节来研究。用 O₃ 浓度、气温、相对湿度和风速的监测结果进行回归计算分析。(显著性)结果见图 9。

O₃ 小时浓度与温度、湿度有较好的相关性,相关系数分别为 0.67 和 0.55;与风速为中等相关,相关系数为 0.40。因此,O₃ 小时浓度与温度、湿度及风速都有一定的相关性。其中,O₃ 小时浓度与温度、风速成正相关,与湿度成负相关。O₃ 小时浓度与温度、风速成正相关,不仅说明 O₃ 浓度变化与太阳辐射强度有相似的变化规律,同时也说明影响 O₃ 浓度变化的因素比较复杂,除了太阳辐射强度有直接影响外,风速增大而浓度升高说明外源输送对本地 O₃ 浓度增加也有贡献。参见图 9。

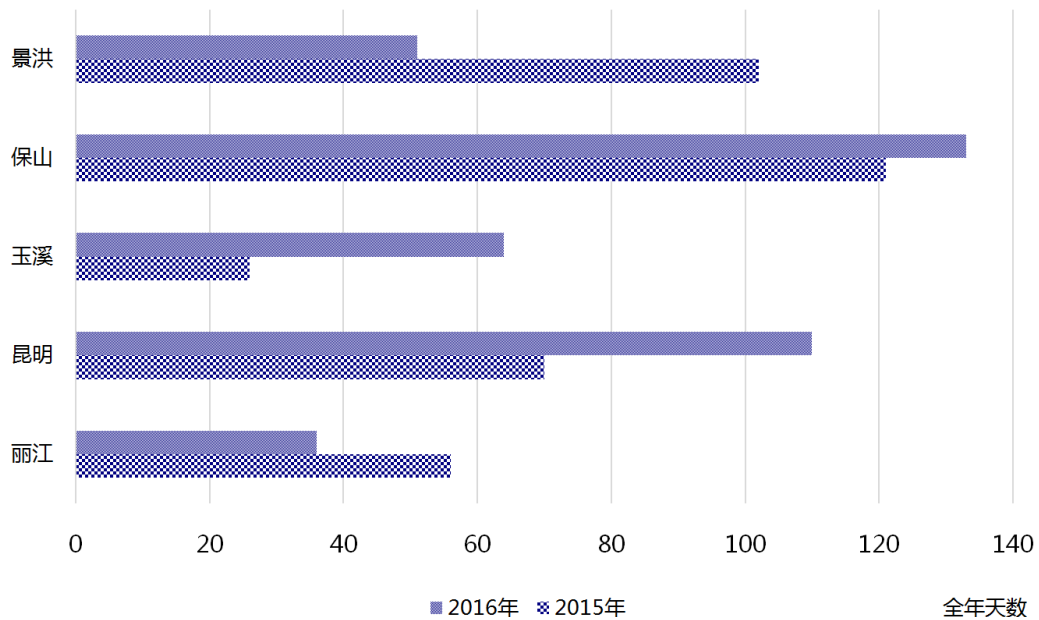
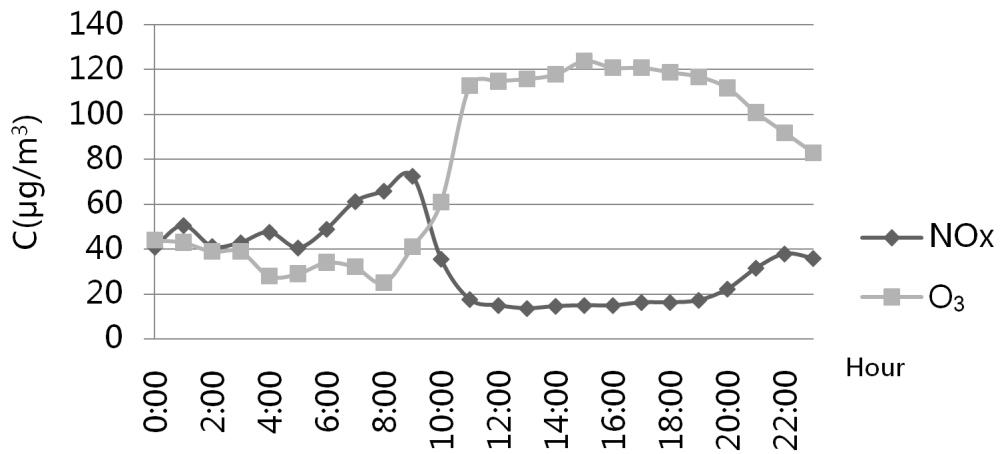


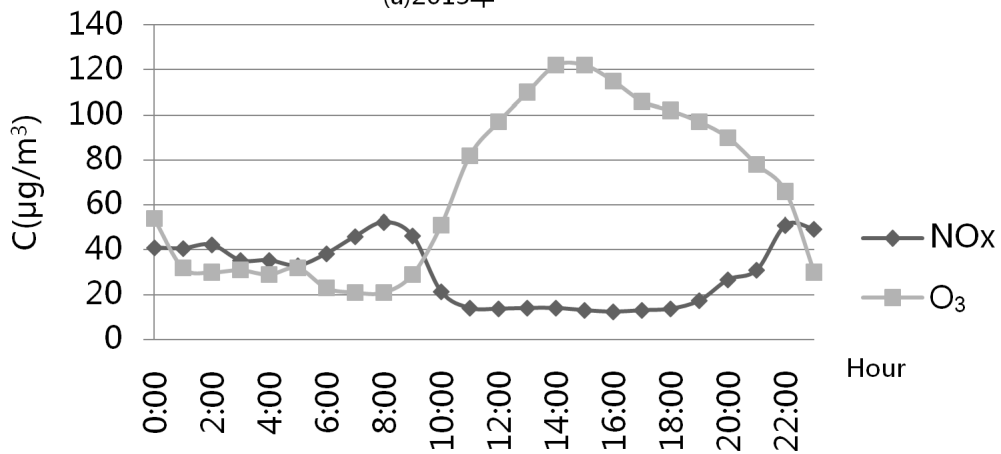
Figure 7. In 2015-2016, variation trends of number of days for ozone concentration level two in five cities
图 7. 2015~2016 年五个城市 O₃ 浓度二级天数变化趋势

Table 1. In 2015-2016, variations list of number of days for ozone concentration level two in five cities
表 1. 2015~2016 年五个城市 O₃ 二级天数变化情况一览表

项目		丽江	昆明	玉溪	保山	景洪
2015 年	O ₃ 浓度达二级天数	56	70	26	121	102
	二级天数全年占比%	15.3	19.2	7.1	33.2	27.9
	O ₃ 浓度超标天数	0	0	0	0	0
	超标天数全年占比%	0	0	0	0	0
2016 年	O ₃ 浓度达二级天数	36	110	64	133	51
	二级天数全年占比%	9.8	30.1	17.5	36.3	13.9
	O ₃ 浓度超标天数	0	3	0	4	1
	超标天数全年占比%	0	0.8	0	1.1	0.3
两年比较	二级天数变化	-20	40	38	12	-51
	超标天数变化	0	3	0	4	1



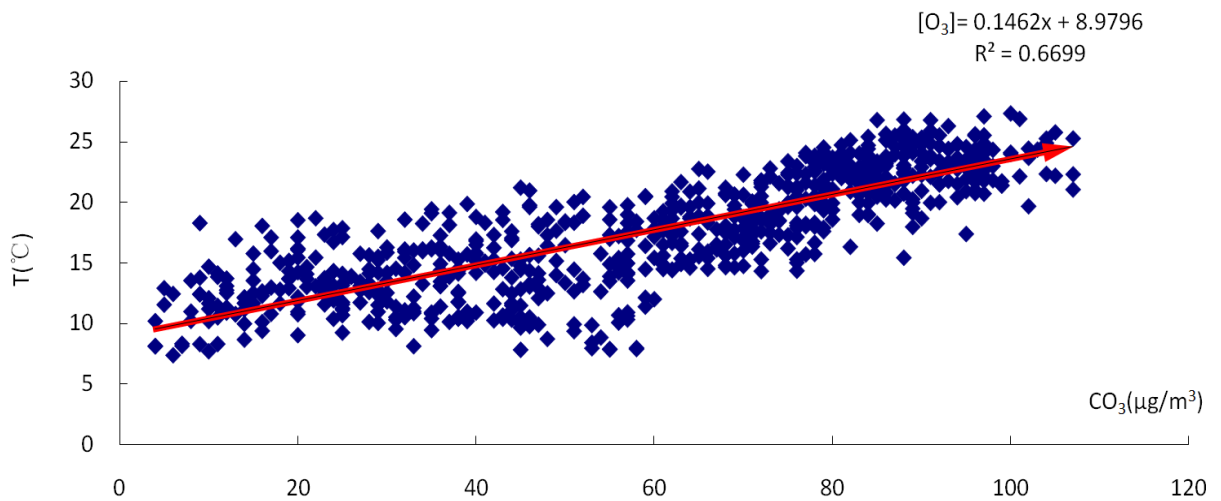
(a)2015年



(b)2016年

Figure 8. Ozone and nitrogenoxi 1-hour concentration variations of ambient air automatic monitoring substation in Hongta cultural and sports center

图 8. 红塔文体中心空气自动监测子站 O₃ 和 NO_x 小时浓度变化



(a)T-CO₃拟合

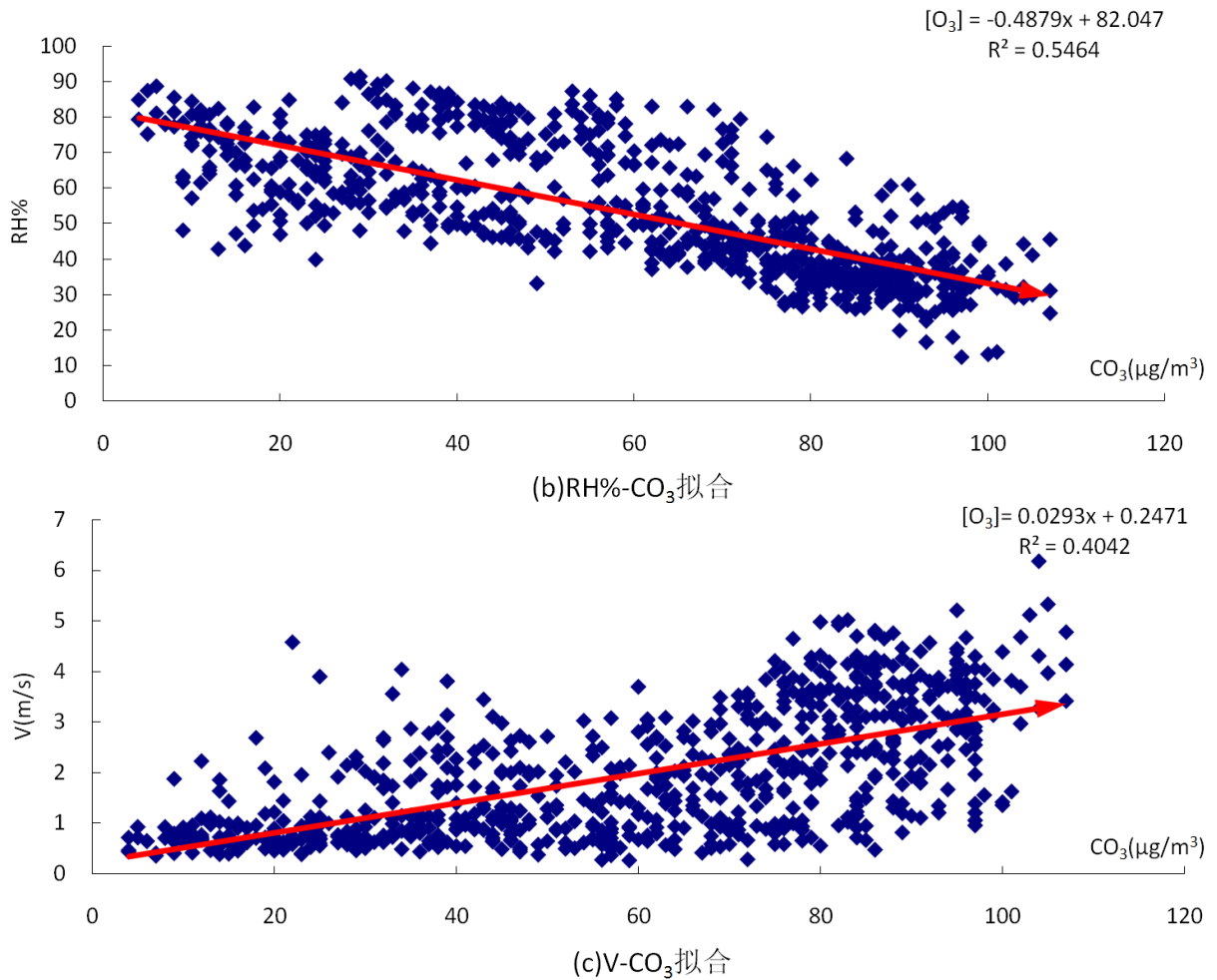


Figure 9. Fitting results of O_3 concentration with temperature ($T/\text{DEG C}$), humidity (RH%) and wind speed ($V/\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)
图 9. O_3 浓度与温度($T/^\circ\text{C}$)、湿度(RH%)和风速($V/\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)的拟合计算结果

云南地处云贵高原，海拔高，热量差异大，紫外线强烈。太阳辐射对大气中的 NO_x 在光照条件下发生的光化学反影响不可忽略。研究发现[1]，云南省的太阳辐射年总量经在向分布和季节分布上差异大。在经向分布上，西部大于东部，东部为 $3400\sim 3800 \text{ MJ}/\text{m}^2$ ，西部为 $5000\sim 6000 \text{ MJ}/\text{m}^2$ 。在季节分布上，云南省近年来的月平均的月总辐射量分布曲线呈单峰型并有春大秋小的特征，4 月份出现全年最大值，为 $572.74 \text{ MJ}/\text{m}$ ，5 月份下降稍小，6 月份下降幅度最大，6~8 月维持在 $470 \text{ MJ}/\text{m}$ 左右，9~11 月份缓慢下降，下降至 11 月份为全年最低值，为 $385.47 \text{ MJ}/\text{m}$ ，12 月份到次年 4 月份为递增过程。干季、雨季太阳总辐射占全年的 50.88%。这一季节规律与本次研究的五个城市 O_3 浓度月份、季节变化规律具一致。

3.2. O_3 产源分析

工业产源

研究表明[2]，云南省工业企业 NO_x 排放主要集中在黑色金属冶炼和压延加工、石油加工、炼焦等行业；其中，非金属矿物制品、电力热力生产及供应、化学原料及化学制品制造业三个行业 NO_x 排放的总量占重点调查工业企业排放量的 82.5%。从地域分布上看，曲靖、昆明、红河、玉溪的排放居前四位，且这四个地区的机动车排放的 NO_x 对排放总量有较大贡献。保山 NO_x 排放的总量远低于玉溪和昆明。景洪、丽江的工业基础相对落后，工业企业不是主要的 NO_x 污染贡献者。

大气中的 NO_x 在光照条件下发生光化学反应, 生成 $\text{O}_3(\text{P})$, 从而与 O_2 生成 O_3 , 故大气中的 NO_x 浓度对 O_3 有直接的影响。另外, 大气中 O_3 浓度还受除 NO_x 以外的因素所影响, 如 VOCs 也对环境空气中的 O_3 浓度有显著影响[3]; 且 NO_x 对 O_3 的影响不一定在所有条件下都表现为正相关[3]。但从目前掌握的监测数据来看, 高原坝区城市, NO_x 对 O_3 的影响主要表现为正相关, 区内近地环境空气中的 NO_x 对 O_3 浓度影响明显, 所以区内 NO_x 排放源是 O_3 浓度变化的主要诱因。

在城市区域中, VOCs 的主要来源是机动车尾气源, 煤炭燃烧源, 工艺过程源、植物排放源、溶剂使用源、汽油挥发源等。其中玉溪市 VOCs 贡献中[4], 机动车尾气源占 36.89%, 煤炭燃烧源占 14.32%, 工艺过程源 10.74%, 植物排放源、溶剂使用源、汽油挥发源等占约 28%。

此外, 风速与 O_3 浓度的正相关性, 表明在气象条件的影响下, 区域外源污染的输入对 O_3 浓度也有贡献。

考查丽江、昆明、玉溪、保山和景洪五地近两年的森林覆盖率特征并与当地 O_3 浓度做比较, 森林覆盖率分布滇南高于滇西北、滇西北高于滇西, 滇西高于滇中。森林覆盖率较高的丽江、景洪, 其 O_3 浓度与森林覆盖率相对较低的昆明相比 O_3 浓度值总体上无显著差别。如表 2 和图 10。

4. 结论

云南省高原城市的 O_3 浓度区域差异不显著, O_3 浓度值也不高, 但部分城市 O_3 浓度全年达二级标准的天数和超出二级标注准天数有所增加, O_3 不时成为影响空气质量的首要污染物; 云南省高原城市的 O_3 浓度变化具有明显的时空特征。

Table 2. In 2015-2016, five regional forest coverage
表 2. 2015~2016 年五地区森林覆盖率

城市名	森林覆盖率(%)		省域位置
	2015 年	2016 年	
丽江	66.15	68.48	滇西北
昆明	49	50	滇中(偏东)
玉溪	55.7	57	滇中
保山	61.9	65	滇西
景洪	84.46	84.99	滇南

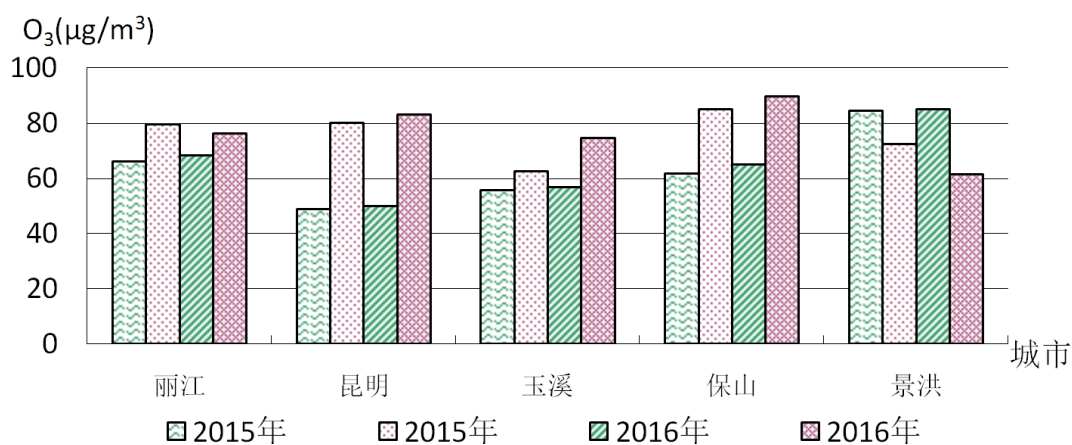


Figure 10. In 2015-2016, comparisons of ozone concentration and forest coverage in five cities
图 10. 2015~2016 年五城市 O_3 浓度与森林覆盖率比较图

计算表明,高原城市 O_3 浓度与 NO_x 的浓度成正相关关系。五个城市中,昆明因工业企业和机动车 NO_x 排放等的因素的影响, O_3 浓度达到二级标准的天数增加较快。与昆明处于同一纬度带的保山,其工业企业和机动车排放 NO_x 的量远低于昆明,但是 O_3 浓度达二级标准的天数却与昆明相当,且 2016 年比 2015 年还有所增加,并与昆明呈现出相同的变化趋势。说明保山的 O_3 浓度的变化受到工业企业和机动车以外的因素左右,如太阳辐射、植物源排放 VOCs 等。

高原城市 O_3 浓度季节变化有规律,春季一般高于夏秋冬季,秋冬季多为一年中浓度较低的季节。高原城市在天气晴朗、日照较长的季节 O_3 浓度受到日照的影响,在光化学反应的作用下容易导致 O_3 浓度升高。

此外,其他的气象条件对 O_3 浓度有影响。计算表明, O_3 小时浓度与温度、风速成正相关,与湿度成负相关。

综上,城市区域的内源污染和大气运动所输送的外源污染是高原城市 O_3 污染的成因和四季变化的主要因素。内源因素是本次研究的重点。发现:云南省高原城市由于植被覆盖率高和太阳辐射强度高的自身特点,VOCs 植物排放源和光化学反应对 O_3 浓度变化的影响是不可忽略的。深入研究其相关关系尚需进行大量的基础工作。受研究条件的限制,本文未能对其进行更深入的探究。但本次研究的统计数据表明,云南省高原城市的 O_3 污染时空特征的形成受工业企业污染、植物排放源与太阳辐射强度的共同作用。其三者中的单一因素难以主导区域浓度变化特征的形成。

大气输送的外源污染目前无法得到有效控制,而控制高原城市 O_3 内源污染需要控制区域内 NO_x 污染和 VOCs 污染。控制 NO_x 和 VOCs 则需要控制其主要产源:工业企业和机动车。由于工业企业中非金属矿物制品、电力热力生产及供应、化学原料及化学制品制造业三个行业 NO_x 排放的总量占重点调查工业企业排放量的 82.5% [2],所以应重点控制工业企业中这三个行业的 NO_x 排放。

污染控制除了需要从点上做好节能减排工作以外,还应该从面上积极调整产业结构和能源结构。产业调整方面,需要加快云南省工业产业升级换代,不断削减区域内高污染高能耗的工业企业的数量,加快淘汰落后产能。能源结构方面,充分利用好国家西南能源通道建设的契机,大力提高清洁能源在整个能源结构中的比重。

参考文献 (References)

- [1] 郭燕,李长建. 云南近 45 年太阳辐射初步研究[J]. 农业与技术, 2013(2): 154.
- [2] 段友爱,高毅. 云南省主要污染物排放情况分析[J]. 环境科学导刊, 2016, 35(5): 74-76.
- [3] 潘本锋,程麟钧,王建国,等. 京津冀地区 O_3 污染特征与来源分析[J]. 中国环境监测, 2016, 32(5): 17-23.
- [4] 宁平,史建武,丁祥,等. 玉溪市中心城区大气污染物来源解析技术研究报告[R]. 昆明: 昆明理工大学, 2016.6.