

五台山景区空气质量及其时空变化特征分析*

武智晖 樊文华[#] 刘奋武 段青倩 王 坤 刘霞霞

(山西农业大学资源环境学院,山西 晋中 030801)

摘要 为研究人类粗放式旅游活动对自然景区空气质量的影响,以五台山景区为例,对景区内五爷庙、杨柏林村、殊像寺、南山寺旁原始森林共4个采样点的 SO_2 、 NO_2 、总悬浮颗粒物(TSP)、 PM_{10} 进行采样分析。空气污染指数评价结果表明,五台山景区五爷庙与殊像寺空气质量属于轻度污染,前者首要污染物为TSP,后者首要污染物为 NO_2 。杨柏林村与南山寺旁原始森林的空气质量为良,虽然空气质量优于五爷庙及殊像寺。与1983年相比,2014年五爷庙TSP浓度降低2.80%,其余各采样点TSP浓度增加了16.00%~106.45%。4个采样点 NO_2 、 SO_2 浓度分别增加了8.93~40.76、0.53~52.36倍。

关键词 五台山景区 空气质量 时空分布特征 污染因素

DOI:10.15985/j.cnki.1001-3865.2015.06.012

Air quality and its temporal and spatial characteristic analysis in Mount Wutai scenic area WU Zhihui, FAN Wenhua, LIU Fenwu, DUAN Qingqian, WANG Kun, LIU Xiaxia. (College of Resource and Environment, Shanxi Agricultural University, Jinzhong Shanxi 030801)

Abstract: The Mount Wutai scenic area, located in Wutai county, Shanxi province, was selected as research object to investigate the effect of human vulgar activities on air quality in natural scenic spot. The concentration of SO_2 , NO_2 , TSP and PM_{10} in 4 sampling sites of Wuye Temple, Yangbolin village, Manjusri Temple, and primeval forest beside South Mountain Temple were monitored. The results showed that air quality in Wuye Temple and Manjusri Temple belonged to the light pollution. The main pollutant of Wuye Temple was TSP and main pollutant of Manjusri Temple was NO_2 . The air quality in Yangbolin village and forest beside South Mountain Temple was better than that in Wuye Temple and Manjusri Temple point mentioned above. Compared with the data obtained in 1983, TSP concentration in 2014 decreases by 2.80% in Wuye Temple, while increases by 16.00%-106.45% in other three sampling points. In addition, the concentrations of NO_2 and SO_2 were increased by 8.93-40.76 times and 0.53-52.36 times compared with the data monitored in 1983.

Keywords: Mount Wutai scenic area; air quality; spatial and temporal distribution characteristics; pollution factor

大气环境与人们的身体健康密切相关^[1],随着工业发展以及城市化速度加快,大量 NO_2 、 SO_2 排放到大气环境中,对气溶胶及光化学反应的影响越发明显,对人体健康的危害日益严重,成为大气污染所关注的主要问题。同时,我国严重雾霾天气逐渐增多,造成雾霾天气的主要原因为悬浮颗粒物,颗粒物浓度的不断上升对生态环境、人体健康和气候变化等都有很大的影响,引起人们的广泛关注。

近年来,许多学者对空气质量变化特征进行研究,研究区域主要集中在城市及自然保护区,张菊等^[2]对北京市城郊近20年的环境空气质量演变情况进行分析;刘洁等^[3]对北京地区 SO_2 、 NO_x 、 O_3 及 $\text{PM}_{2.5}$ 的变化特征进行城郊对比;姚青等^[4]对2009年天津城区地面 O_3 和 NO_x 的季节变化进行分析;

王英等^[5]对京津冀与长江三角区域的大气 NO_2 污染特征进行了研究。然而,有关自然景区等非城市区域的空气质量研究相对较少,周德平等^[6]对闫山国家森林公园的负氧离子进行观测;吴甫成等^[7]对岳麓山的空气质量变化进行研究。佛教圣地景区为香烛焚烧、祭拜聚集区,具有典型的大气污染特征,关于此类区域的空气质量研究鲜有报道。鉴于此,本研究在旅游旺季选取五台山景区内具有区域功能代表性的4个采样点为研究对象,考察研究期间空气质量参数(NO_2 、 SO_2 、总悬浮颗粒物(TSP)、 PM_{10})的变化,参照《环境空气质量标准》(GB 3095—1996),采用单因子污染指数法与空气污染指数法对五台山空气质量进行评价分析,同时将本次评价结果与山西省生态学会1983年测定的五台山

第一作者:武智晖,男,1990年生,硕士研究生,研究方向为环境监测及评价。[#]通讯作者。

* 山西省科技攻关项目(No.20120313011-1);山西农业大学引进人才科研启动项目(No.XB2011017)。

表 1 采样点信息
Table 1 The information of sampling sites

编号	名称	特点	地理位置	海拔/m
A	五爷庙	景区香烛焚烧、祭拜聚集区	东经 113°35′22.9″, 北纬 39°3′23.3″	1 672
B	杨柏林村	居民生活区、游客住宿区	东经 113°35′12.5″, 北纬 39°2′31.2″	1 661
C	殊像寺	交通枢纽区	东经 113°35′21.5″, 北纬 39°0′9.4″	1 680
D	南山寺旁原始森林	自然环境测量点	东经 113°34′18.4″, 北纬 38°58′54.8″	1 678

空气环境质量背景值相比较,得出 30 年间五台山空气质量的时空变化特征,并进行污染源解析,为五台山景区制定相应的大气污染控制方案提供科学依据。

1 数据来源与研究方法

1.1 采样点布置

采样日期为 2014 年 8 月,在综合分析景区自然环境特征和功能区的的基础上,依据《环境空气质量监测点位布设技术规范》(HJ 664—2013)的要求,选取 4 个功能区作为采样点(见图 1)。为排除不同海拔高度颗粒物沉降速度的差异性,各采样点海拔高度相近,采集器入口距地面高度均设在 1.6 m 左右。各采样点 SO₂、NO₂、TSP 及 PM₁₀ 均每天连续采样 18 h,其中 SO₂、NO₂ 每 1 小时测量 1 次,TSP、PM₁₀ 每 2 小时测定 1 次。采样点信息见表 1。

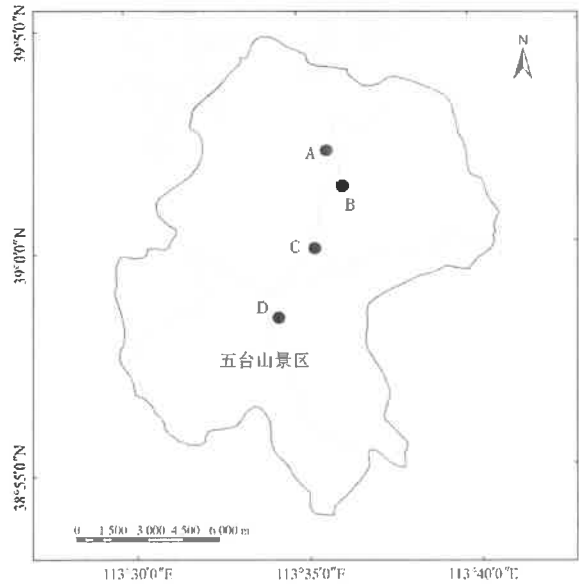


图 1 采样点分布
Fig.1 The distribution of sampling sites

1.2 样品采集及分析方法

本次样品采集使用 KB-6120 型综合大气采样器。其中,TSP、PM₁₀测定参考《环境空气 总悬浮颗粒物的测定 重量法》(GB/T 15432—1995),由玻璃纤维滤膜收集并称量;SO₂测定参考《环境空气 二

氧化硫的测定 甲醛吸收-副玫瑰苯胺分光光度法》(GB/T 15262—94);NO₂测定参考《环境空气 二氧化氮的测定 Saltzman 法》(GB/T 15435—1995),由 N-(1-萘基)-乙二胺盐酸盐缓冲液采集。

1.3 空气质量评价方法

1.3.1 单因子污染指数法

单因子污染指数法被广泛应用于单项污染指标评价,评价公式为:

$$P_i = c_i / S_i \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (1)$$

式中: P_i 为第 i 种污染物的单因子污染指数; c_i 为第 i 种污染物测定值,mg/m³; S_i 为第 i 种污染物的评价标准值,mg/m³; i 为污染物序号; n 为污染物总数。

五台山景区为国家自然保护区,符合 GB 3095—1996 中所规定的环境空气质量功能区中一类区,各项参数浓度参照一级标准(TSP、NO₂、SO₂、PM₁₀ 的日平均限值分别为 0.12、0.08、0.05、0.05 mg/m³)进行评价。

1.3.2 空气污染指数

空气污染指数是将监测的几种空气污染物浓度简化为单一的概念性指数值,并根据指数值分级表征空气污染程度和空气质量状况,适合于表征区域内短期空气质量状况和变化趋势^[8]。参考文献[9]中的方法,计算 TSP 的污染物分项指数,选污染物分项指数的最大值为该区域空气污染指数,并确定该污染物为首要污染物。空气污染指数分级标准见表 2。

表 2 空气污染指数分级标准
Table 2 Classification of air pollution index

空气污染指数	空气质量
0~50	优
50~100	良
100~200	轻度污染
200~300	中度污染
300~400	中度重污染
≥400	重度污染

2 结果与讨论

2.1 单因子污染指数评价

各采样点 TSP、PM₁₀、SO₂、NO₂ 的实际测定质

表 3 各采样点 TSP、PM₁₀、SO₂、NO₂ 实际测定质量浓度
Table 3 The concentration of TSP, PM₁₀, SO₂ and NO₂ in different sampling sites mg/m³

项目	五爷庙		杨柏林村		殊像寺		南山寺旁原始森林	
	日均值	标准偏差	日均值	标准偏差	日均值	标准偏差	日均值	标准偏差
TSP	0.382	0.238	0.029	0.012	0.030	0.010	0.064	0.021
PM ₁₀	0.221	0.117	0.011	0.007	0.006	0.002	0.002	0.001
SO ₂	0.058 7	0.001 5	0.063 3	0.003 5	0.068 0	0.004 5	0.034 3	0.000 6
NO ₂	0.071 0	0.023 9	0.075 5	0.003 8	0.122 0	0.004 3	0.039 5	0.000 9

量浓度见表 3,单因子污染指数见图 2。

研究结果表明,殊像寺 SO₂单因子污染指数最大(1.36),该采样点 SO₂日均值达 0.068 0 mg/m³。五爷庙、杨柏林村及南山寺旁原始森林的 SO₂单因子污染指数分别为 1.17、1.27、0.68,4 个采样点中,南山寺旁原始森林的 SO₂日均值最低(0.034 3 mg/m³)。同 SO₂评价结果类似,殊像寺 NO₂单因子污染指数在各采样点中最大(1.52),相应的,该采样点 NO₂日均值最高(0.122 0 mg/m³),而五爷庙、杨柏林村、南山寺旁原始森林的 NO₂单因子污染指数分别为 0.89、0.94、0.49,说明 3 个采样点 NO₂日均值分别是 GB 3095—1996 中一级标准限值的

89%、94%、49%。五爷庙 TSP 单因子污染指数最大(3.18),TSP 日均值为 0.382 mg/m³,分别为杨柏林村、殊像寺与南山寺旁原始森林 TSP 日均值的 13.17、12.73、5.97 倍。同 TSP 类似,PM₁₀单因子污染指数最大值(4.41)出现在五爷庙,该采样点 PM₁₀日均值为 0.221 mg/m³,分别为杨柏林村、殊像寺以及南山寺旁原始森林 PM₁₀日均值的 20.09、36.83、110.50 倍。

综上所述,五台山景区大气颗粒物污染(TSP、PM₁₀)主要位于五爷庙周边,其余 3 个采样点的颗粒物污染相对不明显。各采样点 SO₂污染程度较为严重,采样超标率达 75%,而 NO₂ 污染程度相对

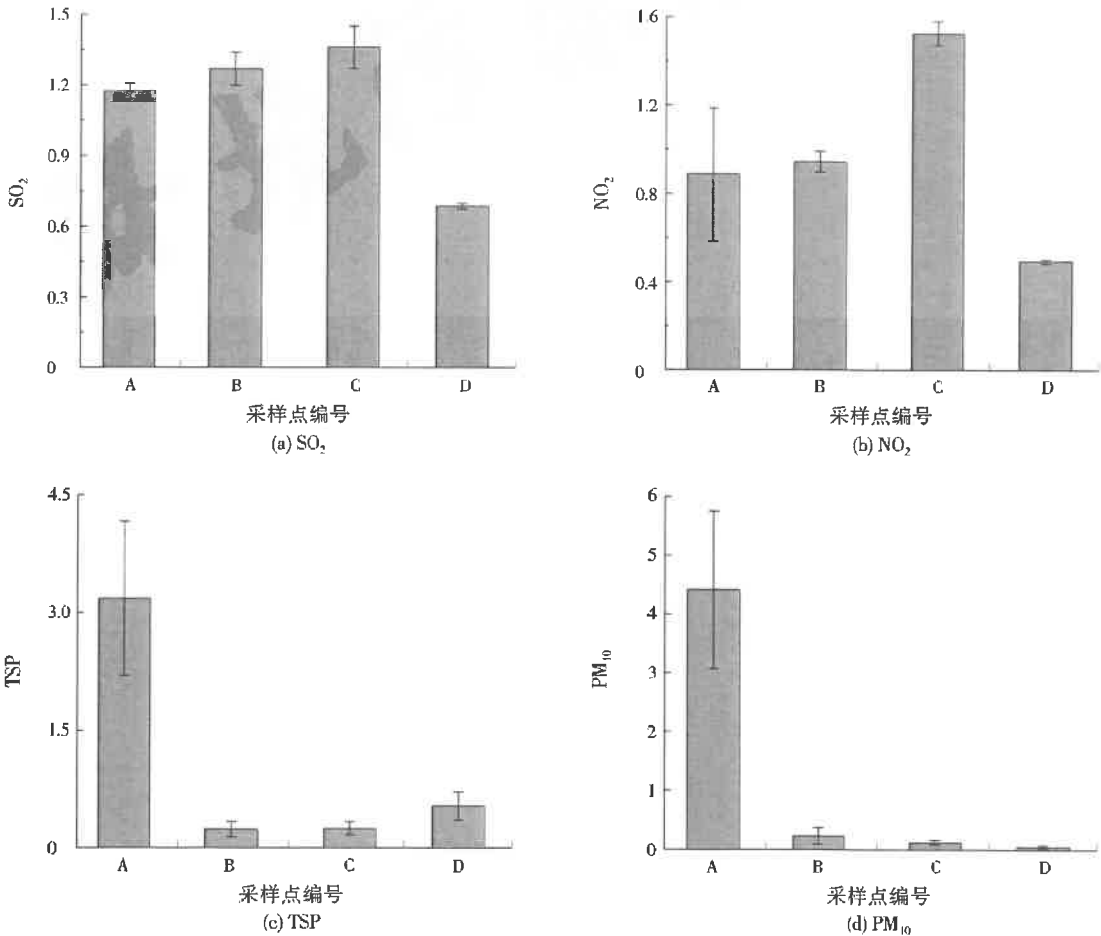


图 2 五台山景区各采样点的大气单因子污染指数
Fig.2 The single factor pollution index for air quality in different sampling sites of Mount Wutai scenic area

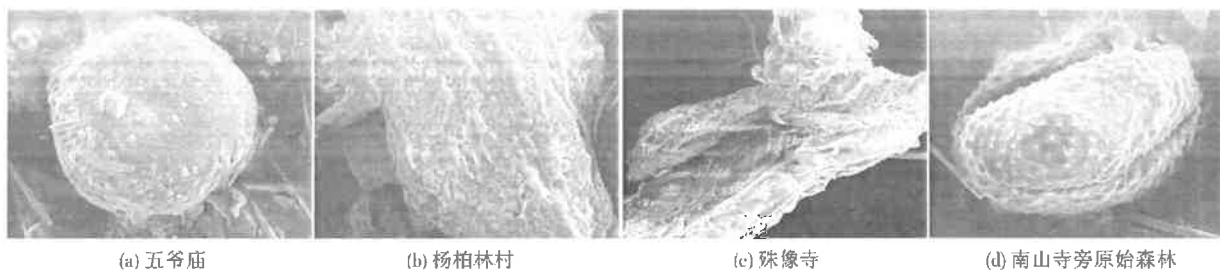


图3 五台山景区大气中颗粒物形态

Fig.3 The morphology of atmospheric particles in Mount Wutai scenic area

较低,采样超标率为25%。结合实际情况分析,五爷庙 TSP、PM₁₀ 浓度较高的原因为该采样点处于景区核心区,旅游人流较大。前人研究表明,区域扬尘排放与区域人流量负荷成正比^[10],逐年增加的旅游人数使人为扬尘对大气颗粒物污染的贡献越来越大。同时,该采样点香烛焚烧集中,祭拜产生的香烛焚烧烟雾较为浓烈,生物质燃烧排放及二次形成的污染气体、气溶胶颗粒物等对颗粒物浓度影响较大^[11]。南山寺旁原始森林的 TSP 浓度较高,分析原因可能与采样点位于山腰处有关,五台山景区为山隘地形,污染物受山谷风影响较大,由于采集时间为夏季晴天,污染气体的垂直输送主要通过山谷风环流,将山底污染物垂直向山顶输送^[12],杨柏林村、殊像寺 TSP 浓度较低,这与 2 个采样点区域空旷,道路的绿化隔离带对于减少道路颗粒污染物向非机动车道扩散具有明显的作用,并且绿化隔离使道路存在街道微峡谷效应,导致间隔内风速增加,促进了颗粒物的快速转移^[13-14],因此杨柏林村、殊像寺采样点 TSP 浓度偏低。

SO₂、NO₂ 方面,五爷庙、杨柏林村、殊像寺 3 个采样点的 SO₂、NO₂ 单因子污染指数均较大,原因在于 3 个采样点均位于人类活动频繁区域,生物质燃料以及化石燃料的大量使用,是该地区产生 SO₂ 及 NO₂ 的主要原因^[15]。南山寺旁原始森林的 SO₂、NO₂ 单因子污染指数均为最小,因为该采样点植物群落繁多,植物在夏秋季对空气中 SO₂、NO₂ 具有较好的吸收、存贮和促沉降作用^[16]。

值得一提的是,笔者采用扫描电镜(SEM)对 4 个采样点的大气颗粒物形态进行观察(见图 3),发现在五爷庙采集的颗粒物多为球状,杨柏林村采集的颗粒物上分布有较多的鳞片状聚合物,殊像寺处的颗粒物多为土壤碎屑类物质,南山寺旁原始森林处的颗粒物中以绢蒿属植物花粉为主^[17]。

2.2 空气污染指数评价

五台山景区各采样点的空气污染指数见图 4。

由图 4 可见,4 个采样点的空气污染指数在 64~192,根据表 2,4 个采样点中 2 个采样点为轻度污染,2 个采样点为良好。

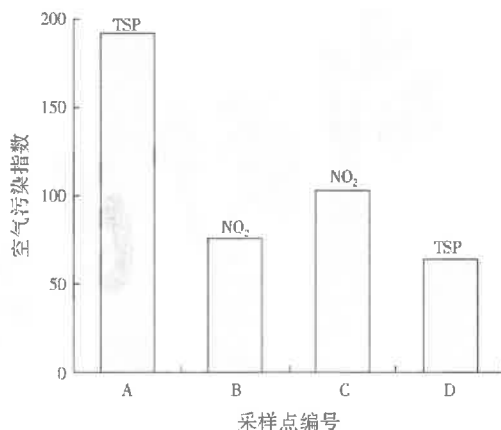


图4 五台山景区各采样点空气污染指数

Fig.4 The air pollution index in different sampling sites of Mount Wutai scenic area

五爷庙的空气污染指数为 192,属于轻度污染,首要污染物为 TSP。由于该采样点位于景区祭拜活动聚集区域,祭拜伴随的香烛焚烧是其污染的主要来源。杨柏林村空气质量良好,空气污染指数为 76,首要污染物为 NO₂。殊像寺空气质量为轻度污染,空气污染指数为 103,首要污染物为 NO₂,该采样点靠近景区集中停车场,交通繁忙,随着逐年增加的旅游量,交通车流只增不减,针对空气污染特点,该采样点可以种植适宜生长、对 NO_x 具有较强吸收能力的绿化植物,如红花银桦、黄槐等^[18]。南山寺旁原始森林的空气质量良好,空气污染指数为 64,首要污染物为 TSP,由于该采样点靠近旅游核心区域,人类活动对大气质量影响较大。

2.3 空气质量演变趋势

结合 1983 年测得的五台山景区环境质量背景值和本次空气质量监测数据,分析五台山景区空气质量 30 余年的演变趋势及影响因素。1983 年的环境质量背景值中,选取与本次采样点相隔较近的区域及采样日期相近的数据进行对比,以使研究结果

具有可比性,结果见图5。

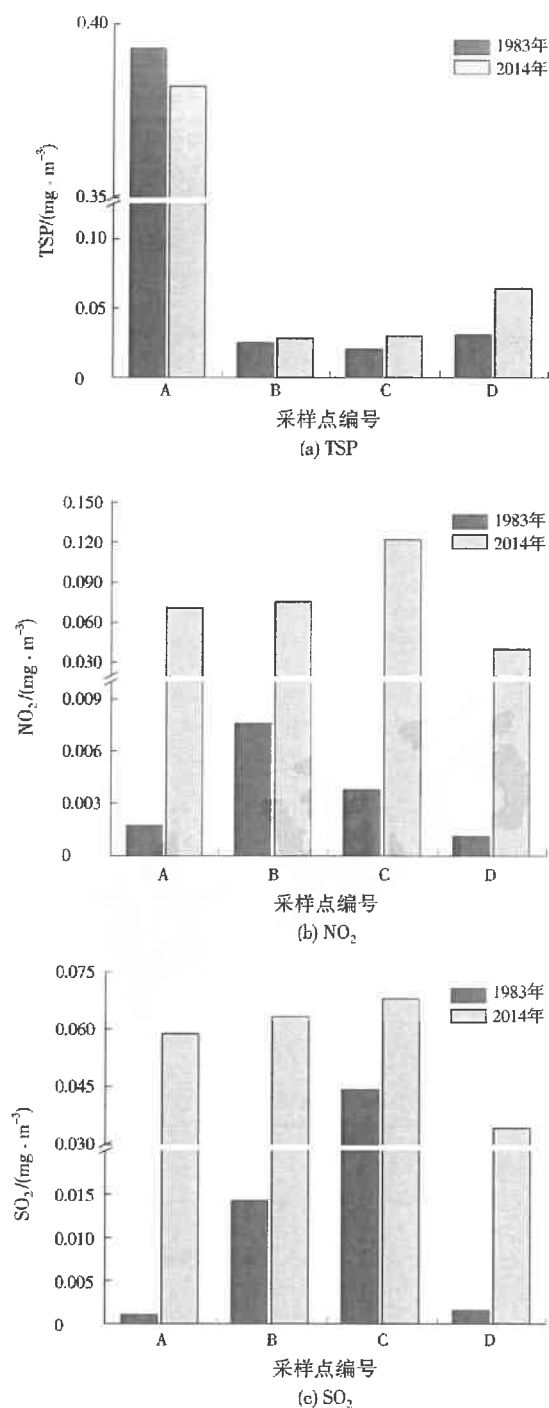


图5 五台山景区空气质量对比

Fig.5 Air quality comparison with historical data in Mount Wutai scenic area

由图5可见,与1983年测定的环境质量背景值相比,4个采样点TSP增幅-2.80%~106.45%,NO₂增加8.93~40.76倍,SO₂增加0.53~52.36倍。

颗粒物浓度方面,五爷庙TSP日均值由1983年的0.393 mg/m³减少至2014年的0.382 mg/m³,

减少了2.80%,是4个采样点中唯一TSP减少的区域。由此可见,五台山景区管理部门对景区核心区域的环境整治已见成效。杨柏林村TSP日均值由1983年的0.025 mg/m³增加到2014年的0.029 mg/m³,增加了16.00%。由于该采样点位于居民区,TSP浓度增加的主要因素是旅游人数逐年增加,人为扬尘及化石燃料燃烧导致颗粒物浓度升高^[19]。殊像寺TSP日均值由1983年0.020 mg/m³增加至2014年0.030 mg/m³,相比增加了50.00%。由于该区域靠近景区主要停车场,交通扬尘是TSP浓度增加的主要因素。南山寺旁原始森林的TSP日均值从1983年0.031 mg/m³升高至2014年0.064 mg/m³,增加了106.45%,这是由于近年来五台山植被由于温度升高^[20]、人为放牧、旅游活动频繁等原因,造成五台山植被破坏,导致该区域蓄水保土能力减弱,土壤风化速度加快,随风带来的颗粒物较多,使采样点TSP在研究时间段内大幅增长。

SO₂、NO₂方面,五爷庙SO₂日均值由1983年的0.0011 mg/m³升高至2014年的0.00587 mg/m³,增加了52.36倍,NO₂日均值由1983年的0.0017 mg/m³升高至2014年的0.00710 mg/m³,增加了40.76倍,是4个采样点中SO₂、NO₂浓度增幅最大的区域。五爷庙为旅游与佛教汇聚点,随着五台山景区旅游人流量日益增多,祭拜活动使得香烛焚烧量增大,而香烛等祭拜燃烧用品大部分由木屑和石蜡制成,根据田贺忠等^[21]的研究,木屑等生物质燃烧排放的SO₂、NO₂排放量占两者排放总量的40%、70%左右,可知由香烛焚烧量增大带来的SO₂、NO₂浓度增加不容小觑。杨柏林村采样点SO₂日均值由1983年的0.0142 mg/m³升高至2014年的0.0633 mg/m³,增加了3.46倍,NO₂日均值由1983年的0.0076 mg/m³升高至2014年的0.0755 mg/m³,增加了8.93倍。杨柏林村SO₂、NO₂浓度增大,可能是由于旅游人数增加,餐饮、供热等化石燃料需求增多造成。郝吉明等^[22]研究表明,城镇郊区燃煤对区域SO₂污染的贡献率是24%,对NO₂污染的贡献率是26%。殊像寺SO₂日均值由1983年的0.0443 mg/m³升高至2014年的0.0680 mg/m³,增加了0.53倍,NO₂日均值由1983年的0.0038 mg/m³升高至2014年的0.1220 mg/m³,增加31.11倍。殊像寺NO₂浓度大幅增加,是因为该采样点临近景区主要停车场,旅游活动附带的机动车流量日益增多,尾气排放量逐年升高。

蔡皓等^[24]研究表明,大型车与小型车搭载相同人数,大型车较小型车排放的 NO_2 少,而近年来盛行的自驾游使得景区小型车流量增大,相同人流量带来更多的 NO_2 排放。南山寺旁原始森林的 SO_2 日均值由1983年的 0.0016 mg/m^3 升高至2014年的 0.0343 mg/m^3 ,增加了20.44倍, NO_2 日均值由1983年的 0.0011 mg/m^3 升高至2014年的 0.0395 mg/m^3 ,增加了34.91倍。该采样点处于五台山核心区下风向山坡处,而在山谷地形中,污染物能通过山谷风输送到边界层以上,形成抬升的污染层,污染气体通过湍流扩散由地面向上传输^[24],测量点处于该湍流交汇处,污染物浓度相对较高。

3 结 论

(1) 根据空气污染指数评价法,五台山景区内五爷庙的空气质量为轻度污染,主要污染物为TSP,该采样点 SO_2 、 NO_2 浓度也较高,殊像寺空气质量为轻度污染,主要污染物为 NO_2 。其余2个采样点空气质量良好。然而,GB 3095—1996规定,自然保护区、风景名胜区属于环境空气质量功能区中的一类区,对照本次测量数据,景区内殊像寺的 NO_2 ,五爷庙、杨柏林村、殊像寺的 SO_2 ,五爷庙的TSP和 PM_{10} 均超过GB 3095—1996一级标准。

(2) 通过对比1983年与2014年的监测数据可知,五台山景区30余年来TSP浓度总体为升高趋势,南山寺旁原始森林的TSP升高幅度最大,达106.45%,但在五爷庙处有降低趋势,降幅为2.80%。 NO_2 、 SO_2 浓度在4个采样点均有升高,分别增加8.93~40.76、0.53~52.36倍。

参考文献:

- [1] 李文杰,张时煌,高庆先,等.京津石三市空气污染指数(API)的时空分布特征及其与气象要素的关系[J].资源科学,2012,34(8):1392-1400.
- [2] 张菊,苗鸿,欧阳志云,等.近20年北京城市近郊区环境空气质量变化及其影响因素分析[J].环境科学学报,2006,26(11):1886-1892.
- [3] 刘洁,张小玲,徐晓峰,等.北京地区 SO_2 、 NO_x 、 O_3 和 $\text{PM}_{2.5}$ 变化特征的城郊对比分析[J].环境科学,2008,29(4):1059-1065.
- [4] 姚青,孙玫玲,蔡子颖,等.2009年天津城区地面 O_3 和 NO_x 的季节变化与相关性分析[J].环境化学,2011,30(9):1650-1656.
- [5] 王英,李令军,刘阳.京津冀与长三角区域大气 NO_2 污染特征[J].环境科学,2012,33(11):3685-3692.
- [6] 周德平,佟维华,温日红,等.闫山国家级森林公园负氧离子观测及其空气质量分析[J].干旱区资源与环境,2015,29(3):181-187.
- [7] 吴甫成,姚成胜,郭建平,等.岳麓山空气负离子及空气质量变化研究[J].环境科学学报,2006,26(10):1737-1744.
- [8] 李向阳,丁晓妹,高宏,等.中国北方典型城市API特征分析

- [9] 张铁男,向运荣,张毅强,等.我国与国际空气污染指数系统的比较[J].环境科学学报,2009,29(8):1601-1610.
- [10] 许妍,周启星.天津城市交通道路扬尘排放特征及空间分布研究[J].中国环境科学,2012,32(12):2168-2173.
- [11] LANGMANN B, DUNCAN B, TEXTOR C, et al. Vegetation fire emissions and their impact on air pollution and climate [J]. Atmospheric Environment, 2009, 43(1): 107-116.
- [12] 邱崇践,蒲朝霞.山谷风环流控制下的大气污染物输送和扩散过程:二维数值模拟研究[J].高原气象,1991,10(4):362-370.
- [13] 蔺银鼎,武小刚,郝兴宇,等.城市机动车道颗粒物扩散对绿化隔离带空间结构的响应[J].生态学报,2011,31(21):6561-6567.
- [14] 李萍,王松,王亚英,等.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[J].生态学报,2011,31(10):2888-2896.
- [15] 李名升,任晓霞,周磊,等.中国大气 SO_2 污染与排放的空间分离分析[J].环境科学学报,2013,33(4):1150-1157.
- [16] 贺勇,李磊,李俊毅,等.北方30种景观树种净化空气效益分析[J].东北林业大学学报,2010,38(5):37-39.
- [17] 孙会忠,贺学礼,陈铁山,等.中国绢蒿属 *Seriphidium* (Bess.) Poljak. 16种植物花粉形态研究[J].自然科学进展,2007,17(1):35-41.
- [18] 潘文,张卫强,张方秋,等.广州市园林绿化植物苗木对二氧化硫和二氧化氮吸收能力分析[J].生态环境学报,2012,21(4):606-612.
- [19] 李金香,董树屏,虞统,等.北京夏季典型天气TSP组成和来源对比[J].环境科学研究,2007,20(6):87-93.
- [20] 戴君虎,潘娜,崔海亭,等.五台山高山带植被对气候变化的响应[J].第四纪研究,2005,25(2):216-223.
- [21] 田贺忠,郝吉明,陆永琪,等.中国生物质燃烧排放 SO_2 、 NO_x 量的估算[J].环境科学学报,2002,22(2):204-208.
- [22] 郝吉明,王丽涛,李林,等.北京市能源相关大气污染源的贡献率和调控对策分析[J].中国科学D辑:地球科学,2005,35(21):115-122.
- [23] 蔡皓,谢绍东.中国不同排放标准机动车排放因子的确定[J].北京大学学报:自然科学版,2010,46(3):319-326.
- [24] 金祺,银燕,谭稳.黄山地区复杂地形下污染气体输送过程的数值模拟[J].大气科学学报,2012,35(6):680-688.

编辑:丁 怀 (收稿日期:2015-03-10)

(上接第62页)

- [22] 杨冲,胡翔,李安峰,等.龙形水系中心区水体富营养化评价与成因分析[J].环境污染与防治,2012,34(11):50-54.
- [23] 潘继征,熊飞,李文朝,等.云南抚仙湖透明度的时空变化及影响因素因子分析[J].湖泊科学,2008,20(5):681-686.
- [24] 吕映春,王飞儿,陈英旭,等.千岛湖水体叶绿素a与相关环境因子的多元分析[J].应用生态学报,2003,14(8):1347-1350.
- [25] 曲丽梅,姚德,丛丕福.辽东湾氮磷营养盐变化特征及潜在性富营养评价[J].环境科学,2006,27(2):263-267.
- [26] 朱永青,淀山湖底泥氮磷营养盐释放及其影响因素研究[J].环境污染与防治,2014,36(5):70-77.
- [27] 朱元荣,张润宇,吴丰昌,等.贵州红枫湖沉积物生物可利用磷分布特征及其与粒径的关系[J].湖泊科学,2010,22(4):513-520.
- [28] 齐瑞环,龙健,朱健,等.贵州高原喀斯特深水水库水质变化与趋势分析[C]//农村污水处理及资源化利用学术研讨会论文集.天津:天津科技出版社,2008:102-107.

编辑:黄 苇 (收稿日期:2014-12-05)