

环鄱阳湖城市群空气质量时空分布*

陈优良 陶天慧[#] 刘新意

(江西理工大学建筑与测绘工程学院,江西 赣州 341000)

摘要 为探索近两年环鄱阳湖地区12个城市(即环鄱阳湖城市群)空气质量时空分布,运用统计学和地理信息系统(GIS)方法对2015年1月至2016年12月共24个月的空气质量监测数据进行分析,结果表明:(1)整体上,黄山污染天数最少,宣城最多,其余10个城市均存在不同程度的污染现象; O_3 、 PM_{10} 、 $PM_{2.5}$ 超标(超过《环境空气质量标准》(GB 3095—2012)二级标准限值)天数分别占非优良天数的50.29%、32.37%和93.99%。(2)空气质量指数(AQI)呈环湖核心区高,环湖上围区和环湖下围区低的分布格局,且冬季AQI明显高于春夏秋三季。(3)环鄱阳湖城市群首要污染物在夏季主要为 O_3 ,其余季节主要为 $PM_{2.5}$ 。(4)环鄱阳湖城市群AQI与 $PM_{2.5}$ 相关性最显著,且 $PM_{2.5}$ 与 O_3 、 NO_2 、 SO_2 均呈正相关,体现了前体物的二次转化对 $PM_{2.5}$ 的显著影响。

关键词 环鄱阳湖城市群 时空分布 空气质量指数 地理信息系统 相关性

DOI:10.15985/j.cnki.1001-3865.2018.12.019

Spatial and temporal distribution of air quality of the city group around Poyang Lake CHEN Youliang, TAO Tianhui, LIU Xinyi. (School of Architectural and Surveying Engineering, Jiangxi University of Science and Technology, Ganzhou Jiangxi 341000)

Abstract: To explore the spatial and temporal distribution characteristic of the air quality of 12 cities around Poyang Lake (city group around Poyang Lake), statistical method and geographic information system (GIS) method were used to analyze the air quality data measured in the last 24 months from January of 2015 to December of 2016. The result showed Huangshan had fewest polluted days and Xuancheng had the most polluted days. The other 10 cities had polluted air at different levels. The days in which pollutants O_3 , PM_{10} , $PM_{2.5}$ over the secondary standard of "Ambient air quality standard" (GB 3095-2012) accounted for 50.29%, 32.37% and 93.99% of the non-excellent days, respectively. At the level of temporal and spatial variation, the air quality index (AQI) showed a layout of being high in key area around the lake and low in inner and outside circle area around the lake. Obviously the AQI of winter was higher than that of spring, summer and autumn. From the main pollutant point of view, the primary pollutant was different from different seasons, meaning O_3 in summer while $PM_{2.5}$ in the other seasons. In terms of correlational analysis, AQI was much more related to $PM_{2.5}$ and the concentration of $PM_{2.5}$ had a positive correlation to the concentrations of O_3 , NO_2 , SO_2 , which proved the secondary formation of precursors had obvious effect on $PM_{2.5}$ concentration.

Keywords: city group around Poyang Lake; spatial and temporal distribution; AQI; GIS; correlation

随着工业化及城市化进程不断加快,人口密集,交通发达,机动车数量逐年增加,人类对局部环境改造的能力越来越强,但与此同时,其产生的负面影响(例如水污染、空气污染等)也随之日益突出^[1-2]。研究不同城市、地区的环境质量并加以防治、处理迫在眉睫。继使用 PM_{10} 、 SO_2 、 NO_2 对空气质量进行评价后,《环境空气质量标准》(GB 3095—2012)为空气质量评价加了3个指标($PM_{2.5}$ 、CO、 O_3),使用空气质量指数(AQI)进行评价,使空气质量评价更为准确和严格^[3]。

鄱阳湖是我国最大的淡水湖,有着丰富的自然

资源,并承担着调洪蓄水、调节气候、降解污染等多种生态功能^[4]。以鄱阳湖为点,南昌、九江、景德镇、上饶、鹰潭、抚州环绕,构成环湖核心区,加上环湖上围区(池州、黄山、宣城)和环湖下围区(新余、宜春、吉安),3者构成了环鄱阳湖城市群。2009年12月12日,国务院正式批复了“以保护鄱阳湖为核心、以建设新型生态城市群为依托”的《鄱阳湖生态经济区规划》,鄱阳湖生态经济区成为国内第二个被批复为“生态经济区”的国家实验战略发展区,是江西乃至整个中部地区未来最具有发展潜力和优势的地区之一^[5]。环鄱阳湖城市群是我国重要的生态功能保护

第一作者:陈优良,男,1978年生,硕士,副教授,研究方向为区域环境、地理信息系统技术与应用。[#] 通讯作者。

* 国家自然科学基金资助项目(No.41261093);江西省自然科学基金资助项目(No.2010GQS0080)。

区,也是长江三角洲、珠江三角洲、海峡西岸经济区等重要经济板块的直接腹地,探索鄱阳湖区域空气质量的时空演变对促进生态与经济发展具有重要意义。

目前,国内外学者在空气质量时空分布方面做了许多有益的探索。范庆亚等^[6]研究了上海在2006—2011年空气污染指数(API),讨论了上海市区大气污染的时空分布特征。詹长根等^[7]利用武汉6个月10个监测点的AQI,使用空间插值研究污染的时空分布规律,得出北部地区空气污染高于南部地区。施益强等^[8]基于空间信息技术、克里金插值和空间相关性矩阵,研究厦门SO₂、NO₂、PM₁₀和PM_{2.5}污染浓度空间分布情况,得出了各污染因子与温度、道路的相关性情况。王占山等^[9]对2013年北京35个监测点的PM_{2.5}数据进行连续监测分析,探讨PM_{2.5}的时间和空间分布特征,结果表明,四季中夏季PM_{2.5}浓度最低,冬季浓度最高,各类监测点中浓度由高到低依次是交通站、城区站、郊区站和区域站。云慧等^[10]对深圳2008—2009两年间PM_{2.5}进行采样测量,分析了PM_{2.5}的化学组成及时空分布特征。目前这些研究大多以典型城市作为研究对象,难以反映一个较大范围的整体环境水平,而广义上的环鄱阳湖城市群辐射华中地区、华东地区,是我国重要的都市圈之一,但目前尚未有学者研究环鄱阳湖城市群的空气质量时空演变。本研究以环鄱阳湖12个地级市2015—2016两年间共24个月的空气质量数据为对象,运用数理统计、空间插值、地理信息系统(GIS)等方法,探索环鄱阳湖城市群空气质量时间序列和空间分布特征,分析AQI各因子和首要污染物的分布和影响情况,以期环鄱阳湖地区空气污染防治提供科学依据。

1 数据与方法

1.1 数据来源

本研究采用2015年1月1日至2016年12月31日环鄱阳湖城市群12个城市56个监测点PM_{2.5}、PM₁₀、CO、NO₂、SO₂日均值及O₃日最大8h滑动平均值等6项污染物监测数据。数据主要来自于原环境保护部数据中心,数据爬取后全部保存在SQL Server数据库中。

API和AQI均将空气质量依次划分为:优(0~50)、良(51~100)、轻度污染(101~150)、中度污染(151~200)、重度污染(201~300)和严重污染(>300),其中优级的空气质量下不提示首要污染物。API、AQI都是将常规监测的空气污染物浓度简化

成单一的概念性数值形式,数值越大,级别就越高,表明空气污染越严重,对人体的危害也就越大。API与AQI的区别在于参与评价的污染物种类不同,AQI相比于API(PM₁₀、SO₂、NO₂)多了3个污染物,分别是O₃、CO、PM_{2.5},比API的标准更为严格。先计算各项污染物的空气质量分指数(IAQI),选择其中的最大值确定为AQI,首要污染物即IAQI最大值对应的污染物(在AQI>50的前提下),若IAQI最大值对应的污染物为两项或两项以上时,则并列为首要污染物。

1.2 研究方法

本研究在通过自主设计开发的网络爬虫软件爬取空气质量数据的基础上,对获取的数据进行预处理、空间插值、相关性分析。

数据获取:在对超级文本标记语言(HTML)文档进行规范化表达,文档对象模型(DOM)方法解析网页,去除HTML标签、样式标签、网页脚本等信息,生成网页文本的基础上,利用HTML DOM技术并结合SQL Server,实现每日空气质量网页数据的爬取。

数据预处理:基于SQL Server结构化查询语言,对研究区2015—2016年8772条数据进行整合分析,得到环鄱阳湖城市群的AQI月均值,再计算得到各地级市每日首要污染物情况。

空间插值:将点尺度数据向面尺度信息转换的最佳方法就是空间插值^[11]。其中,克里金插值是建立在半变异函数理论分析基础上,对有限区域内变量取值进行无偏最优估计的一种方法^[12-14],已有相关研究应用此方法对O₃和PM_{2.5}的空间分布进行可视化呈现^[15-16]。晏星等^[17]对大气污染要素空间插值方法进行对比研究,结果表明:与其他方法相比,克里金插值方法更为灵活,能够充分利用数据探索性工具,对正态数据的预测精度最高,插值结果具有空间二阶平稳性^[18]。本研究在ArcGIS环境下,应用克里金插值方法,对研究区AQI和首要污染物的空间分布进行插值分析。

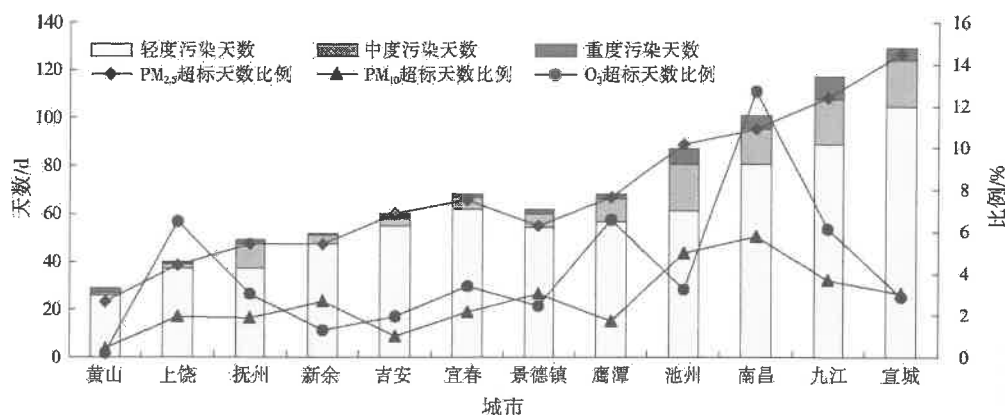
相关性分析:使用统计软件SPSS19对AQI和污染物进行Spearman相关性分析,讨论AQI与污染物的相关性。

2 结果与讨论

2.1 空气质量时空特征

2.1.1 空气质量总体概况

在研究时段包含的24个月中,环鄱阳湖城市群



注:PM_{2.5}、PM₁₀和O₃超标天数比例分别由其超标(超过GB 3095—2012二级标准限值)天数除以非优良天数(865 d)计算得出。

图1 2015—2016年环鄱阳湖城市群污染天数和PM_{2.5}、PM₁₀、O₃超标天数比例

Fig.1 Number of polluted days and non-attainment ratio of PM_{2.5}, PM₁₀ and O₃ in the city group around Poyang Lake during 2015-2016

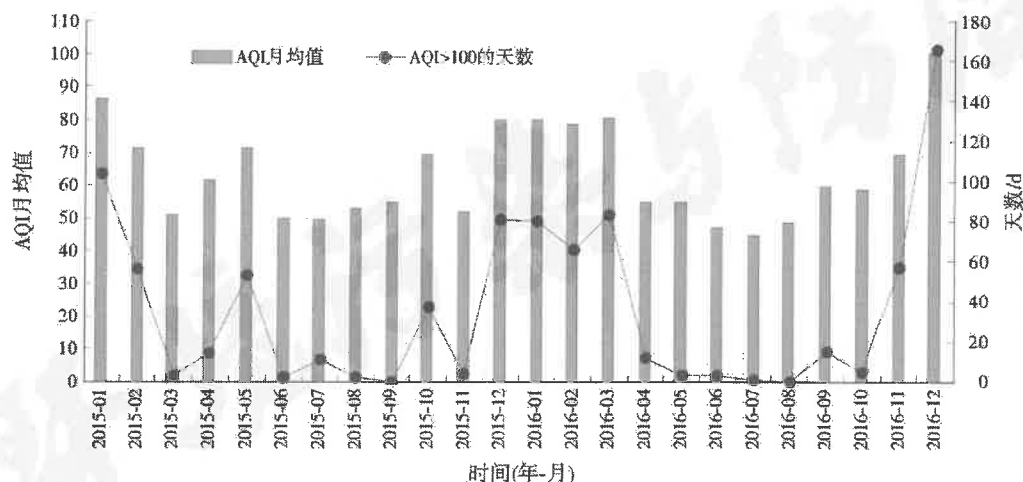


图2 2015—2016年环鄱阳湖城市群AQI月均值与污染天数

Fig.2 Monthly average AQI and number of days with AQI non-attainment in the city group around Poyang Lake during 2015-2016

非优良天数为865 d(其中,轻度污染711 d,中度污染112 d,重度污染39 d,严重污染3 d),占总天数(12个城市监测天数总和,即8 772 d)的9.86%。由图1可以看出,12个城市均存在不同程度的污染状况(AQI>100)。黄山污染天数最少(29 d),为I级;上饶、抚州、新余、吉安污染天数在60 d以内,为II级;宜春、景德镇、鹰潭、池州污染天数在60~90 d,为III级;南昌、九江、宣城污染天数大于100 d,其中宣城污染天数最多,有130 d,将南昌、九江设为IV级,宣城为V级。分污染项来看,环鄱阳湖城市群O₃、PM₁₀、PM_{2.5}超标天数分别占非优良天数的50.29%、32.37%和93.99%,CO、NO₂、SO₂超标天数可忽略不计。其中,南昌、九江、宣城、池州的PM_{2.5}超标天数占非优良天数比例高于10%,O₃污染南昌相对较严重,鹰潭、上饶次之。

2.1.2 时间序列变化

气候学上可采用候温划分法区分四季,其标准是:10℃升至22℃为春季;大于22℃为夏季;22℃降至10℃为秋季;小于10℃为冬季^[19]。由于环鄱阳湖城市群受亚热带季风气候影响,具体天气特点为冬夏长,春秋短,四季温差大,因此将环鄱阳湖城市群的四季具体划分为:春季65 d(3月14日至5月17日);夏季135 d(5月18日至9月29日);秋季59 d(9月30日至11月27日);冬季106 d(11月28日至次年3月13日)。

根据2015—2016年24个月环鄱阳湖城市群各个地级市监测点AQI的每日实时监测数据可得此区域的月变化(见图2)。由图2可以看出,AQI月均值在44.68~100.20波动,空气质量处于优良状态。受温度、降雨、风向的影响,环鄱阳湖城市群的AQI具有明显的季节性变化特征。在2015年,AQI

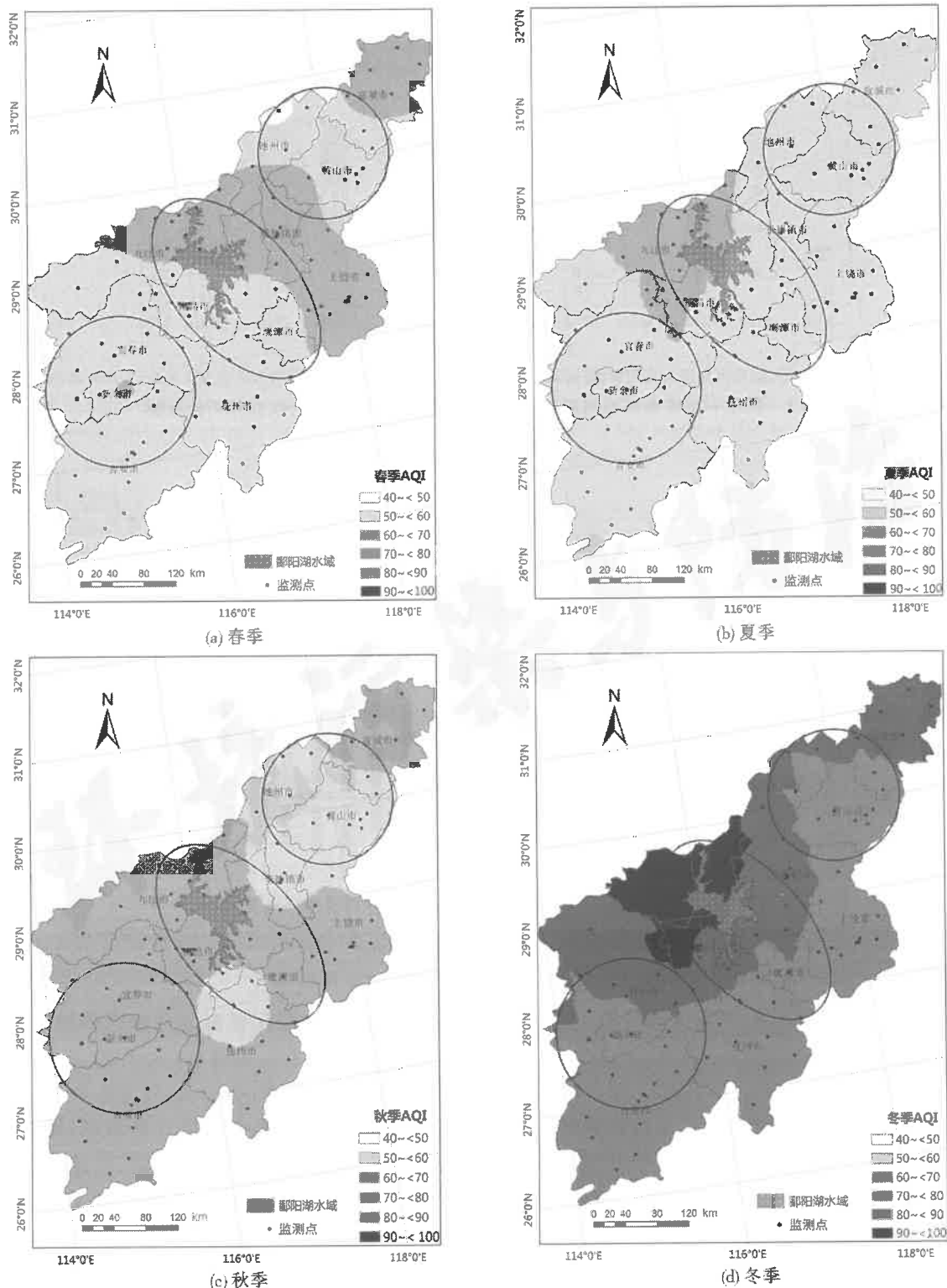


图3 2015—2016年环鄱阳湖城市群四季AQI空间分布格局

Fig.3 Spatial distribution pattern of AQI in the city group around Poyang Lake in four reasons in 2015-2016

在1月达到最大值,1—3月逐渐降低,3—5月逐渐升高,5—10月曲线大体呈现碗状分布,11—12月继续升高。在2016年,AQI在1—3月较平稳,此时处于冬季,均值为79.65;4—10月,AQI与2015年

同时段变化相似,为碗状曲线;AQI在7月达到最小值,12月达到最大值。

环鄱阳湖城市群AQI>100的污染状况月度分布与AQI月均值变化大体相似。2015年1、2、5、12

月和 2016 年 1、2、3、11、12 月污染天数较多。综合 2015 年和 2016 年的结果可得,12 月污染天数最多,为 247 d;1 月次之,为 184 d;8 月空气质量最好。其中,6、7、9 月污染天数也较少,在 24 个月中可忽略不计。

AQI 月差异的原因主要有以下两点:

(1) 1 月处于冬季,大气层结构稳定,空气无法对流,不利于风和降水形成,污染物积聚难扩散,再加上 1 月正值新年,燃放烟花爆竹产生的污染明显多于其他月份,空气质量最糟糕。此后,随着冬季结束,温度回暖,雨水增多,冲刷吸收带走空气中的污染物,AQI 逐渐降低,在 8 月时降到最低。空气污染的核心内因是排放,重要外因是气象。

(2) 环鄱阳湖城市群处于中国淮河以南地区,植被树木众多,春夏之际,植被抽枝发芽,叶片面积显著增加,湿润且具有一定潮湿度的叶片最利于颗粒物的吸收和滞留,在降低大气中颗粒物的同时也净化了空气,降低了 AQI^[29]。

2.1.3 空间分布特征

图 3 为克里金插值得出的环鄱阳湖城市群 AQI 在空间上的分布格局。由图 3 可以看出,环湖核心区 AQI 明显高于环湖上围区和环湖下围区。从 AQI 季节分布上看,环鄱阳湖城市群的春、夏、秋三季 AQI 变化不大,空间分布规律并不十分显著;冬季相比其他三季,AQI 明显增加,空气质量状况明显处于劣势。其中冬季与夏季的差异显著。春夏秋 AQI 始终在 40~<70,且 50~<70 的分布面积最大,空气环境质量为良;冬季存在月均 AQI 超过

100 的状态(见图 2),主要分布于九江、宣城,但整个冬季 AQI 均值未超过 100。从四季平均水平上看,环鄱阳湖城市群空气质量均处于优良状态。

2.2 首要污染物分布特征分析

表 1 展示了环鄱阳湖城市群各种污染物的污染天数及比例。除新余的首要污染物为 PM₁₀,南昌的首要污染物为 PM_{2.5} 和 O₃ 外,其余 10 个城市首要污染物均为 PM_{2.5}。从整体上看,环鄱阳湖城市群中首要污染物为 PM_{2.5},PM₁₀ 和 O₃ 的污染程度仅次于首要污染物,景德镇以北地区(包括景德镇)次要污染物大体为 PM₁₀,以南地区大体为 O₃。环鄱阳湖城市群的空气质量优良天数占比较大比重,其中,上饶、景德镇、鹰潭、抚州、新余、宜春、吉安、黄山 8 城市的优良天数比例均超过 90%,其余城市也都超过 80%。

分析环鄱阳湖城市群首要污染物的月分布,结果见表 2。1—3 月除新余的首要污染物为 PM₁₀ 外,其余城市大体为 PM_{2.5};4—9 月,大多数城市的首要污染物为 O₃;10—12 月,PM_{2.5} 又成为首要污染物。从城市来看,新余和环湖上围区城市(池州、黄山和宣城)全年受 O₃ 污染较小。

分析各城市首要污染物分布情况可以看出,除新余外,其余城市的首要污染物月变化趋势与环鄱阳湖城市群整体一致。从新余 6—9 月的风向频率玫瑰图可以看出,其在 6、7、9 月以东北风和西南风为主,8 月以偏北风为主(见图 4)。以 9 月为例,新余的首要污染物为 PM₁₀,位于其北部的宜春、南部的吉安首要污染物均为 O₃,说明新余的污染物为本地生成的。

表 1 2015—2016 年环鄱阳湖城市群的污染天数、优级天数、良级天数及比例¹⁾

Table 1 The numbers and proportion of polluted,superior and good days in the city group around Poyang Lake during 2015-2016

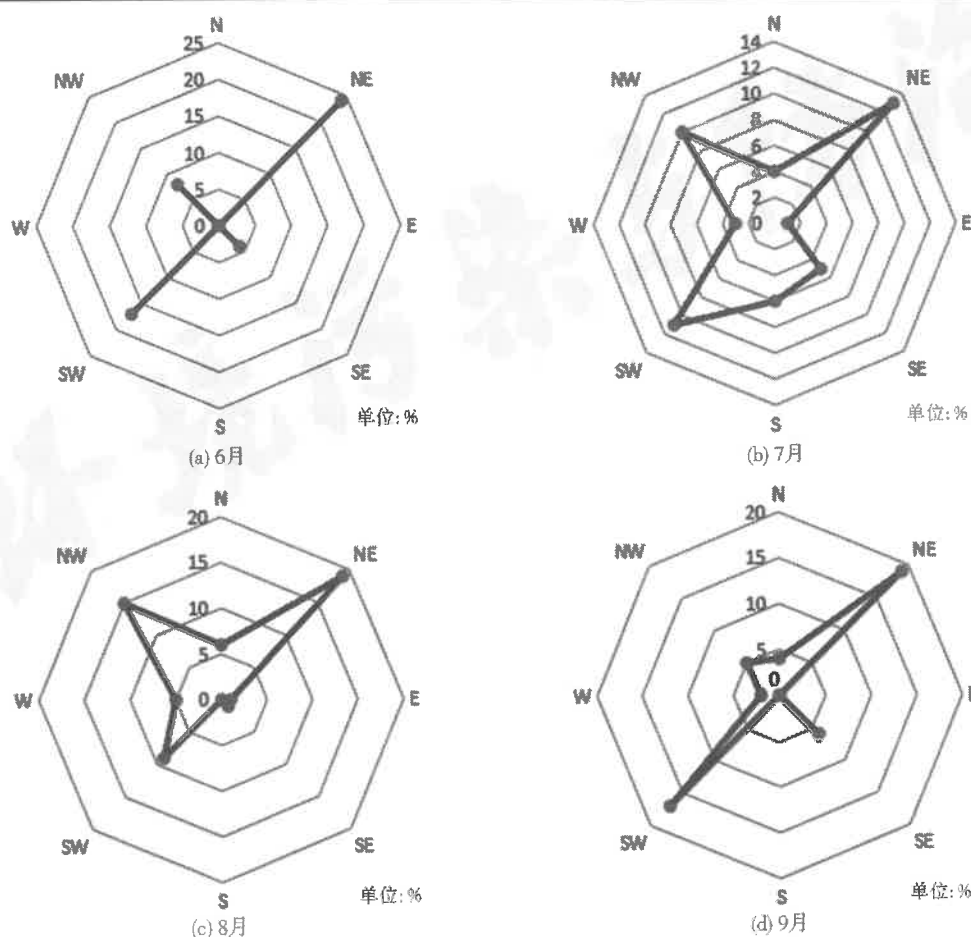
城市	污染天数/d					优级天数/d	良级天数/d
	PM _{2.5}	PM ₁₀	O ₃	NO ₂	混合及其他		
南昌	176(24.1%)*	126(17.2%)	179(24.5%)*	2(0.3%)	7(1.0%)	241(33.0%)	388(53.1%)
九江	270(36.9%)*	109(14.9%)	175(23.9%)	0(0)	0(0)	177(24.2%)	437(59.8%)
上饶	196(26.8%)*	92(12.6%)	167(22.8%)	12(1.6%)	17(2.3%)	247(33.8%)	444(60.7%)
景德镇	238(32.6%)*	128(17.5%)	101(13.8%)	0(0)	3(0.4%)	261(35.7%)	408(55.8%)
鹰潭	210(28.7%)*	53(7.3%)	162(22.2%)	0(0)	5(0.7%)	301(41.2%)	362(49.5%)
抚州	202(27.6%)*	73(10.0%)	153(20.9%)	0(0)	1(0.1%)	302(41.3%)	380(52.0%)
新余	170(23.3%)	283(38.7%)*	62(8.5%)	3(0.4%)	5(0.7%)	208(28.5%)	471(64.4%)
宜春	323(44.2%)*	75(10.3%)	117(16.0%)	0(0)	1(0.1%)	215(29.4%)	448(61.3%)
吉安	317(43.4%)*	29(4.0%)	104(14.2%)	1(0.1%)	1(0.1%)	279(38.2%)	392(53.6%)
池州	205(28.0%)*	78(10.7%)	47(6.4%)	12(1.6%)	0(0)	389(53.2%)	253(34.6%)
黄山	187(25.6%)*	52(7.1%)	23(3.1%)	0(0)	18(2.5%)	451(61.7%)	251(34.3%)
宣城	352(48.2%)*	108(14.8%)	54(7.4%)	31(4.2%)	1(0.1%)	185(25.3%)	416(56.9%)

注:1) 括号中的百分数表示污染、优级、良级天数占总天数(731 d)的比例;* 表示各城市最终筛选的首要污染物。

表2 2015—2016年环鄱阳湖城市群的首要污染物月分布

Table 2 Monthly distribution of the primary pollutants in the city group around Poyang Lake during 2015-2016

城市	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月
南昌	PM _{2.5}	PM _{2.5}	PM _{2.5}	PM ₁₀	O ₃	O ₃	O ₃	O ₃	O ₃	PM ₁₀	PM ₁₀	PM _{2.5}
九江	PM _{2.5}	PM _{2.5}	PM _{2.5}	PM ₁₀	PM _{2.5} 、O ₃	O ₃	O ₃	O ₃	O ₃	PM _{2.5}	PM _{2.5}	PM _{2.5}
上饶	PM _{2.5}	PM _{2.5}	O ₃	PM _{2.5}	O ₃	O ₃	O ₃	O ₃	O ₃	PM _{2.5}	PM _{2.5}	PM _{2.5}
景德镇	PM _{2.5}	PM _{2.5}	PM _{2.5}	PM _{2.5}	O ₃	O ₃	PM ₁₀	O ₃	O ₃	O ₃	PM _{2.5}	PM _{2.5}
鹰潭	PM _{2.5}	PM _{2.5}	O ₃	O ₃	O ₃	O ₃	O ₃	O ₃	O ₃	PM _{2.5}	PM _{2.5}	PM _{2.5}
抚州	PM _{2.5}	PM _{2.5}	O ₃	O ₃	O ₃	O ₃	O ₃ 、PM ₁₀	O ₃	O ₃	PM ₁₀	PM _{2.5}	PM _{2.5}
新余	PM _{2.5}	PM ₁₀	PM ₁₀	PM ₁₀	PM ₁₀	PM ₁₀	PM ₁₀	PM ₁₀	PM ₁₀	PM ₁₀	PM ₁₀ 、PM _{2.5}	PM _{2.5}
宜春	PM _{2.5}	PM _{2.5}	PM _{2.5}	PM _{2.5}	PM _{2.5}	O ₃	O ₃	O ₃	O ₃	PM _{2.5}	PM _{2.5}	PM _{2.5}
吉安	PM _{2.5}	PM _{2.5}	PM _{2.5}	PM _{2.5}	PM _{2.5}	O ₃	PM _{2.5}	O ₃	O ₃	PM _{2.5}	PM _{2.5}	PM _{2.5}
池州	PM _{2.5}	PM _{2.5}	PM _{2.5}	O ₃	PM _{2.5} 、O ₃	PM _{2.5} 、O ₃	PM _{2.5} 、PM ₁₀	O ₃	O ₃	PM _{2.5}	PM _{2.5}	PM _{2.5}
黄山	PM _{2.5}	PM _{2.5}	PM _{2.5}	PM _{2.5}	PM _{2.5}	PM _{2.5}	PM _{2.5}	PM _{2.5}	PM _{2.5}	PM _{2.5}	PM ₁₀	PM _{2.5}
宣城	PM _{2.5}	PM _{2.5}	PM _{2.5}	PM _{2.5}	PM _{2.5}	PM ₁₀	PM ₁₀	O ₃	PM _{2.5}	PM _{2.5}	PM _{2.5}	PM _{2.5}

图4 2015—2016年新余4个月的最大风向玫瑰图
Fig.4 Wind rose of 4 months of Xinyu during 2015-2016

此外,表2中显示5—9月多地首要污染物为O₃。从长期观测来看,O₃集中在日照充足的4—9月,是夏季影响许多城市空气质量的首要污染物。地面O₃除少量由平流层传输外,大部分是由人为排放的NO_x和挥发性有机物在高温光照条件下二次转化形成的。NO_x主要来自机动车、发电厂、燃煤锅炉和水泥炉窑等排放;挥发性有机物主要来自机动车、石化工业排放和有机溶剂的挥发等^[21]。

2.3 相关性分析

由表3可以看出,AQI与PM_{2.5}的相关性最显著,与表1、表2展示的结果一致。此外,PM_{2.5}与O₃、NO₂、SO₂存在显著正相关。SO₄²⁻、NO₃⁻等无机盐离子主要由SO₂、NO₂等气态污染物的光化学反应生成,是PM_{2.5}的重要化学组分^[22]。气态污染物浓度和大气氧化性对PM_{2.5}有较大的影响,大气氧化性又受到O₃、NO₂等氧化剂的影响^[23]。因此,

表3 环鄱阳湖城市群 AQI 与污染物间的相关性¹⁾
Table 3 The correlation of AQI and pollutants in the city group around Poyang Lake

污染物	AQI	PM _{2.5}	PM ₁₀	O ₃	NO ₂	CO	SO ₂
PM _{2.5}	0.993	1.000					
PM ₁₀	0.986	0.993	1.000				
O ₃	0.902	0.888	0.874	1.000			
NO ₂	0.888	0.902	0.888	0.958	1.000		
CO	-0.629	-0.657	-0.636	-0.790	-0.846	1.000	
SO ₂	0.699	0.692	0.671	0.657	0.685	-0.385	1.000

注: ¹⁾在95%置信水平上,除SO₂与CO的相关性不显著外,其余参数两两之间相关性均显著。

O₃、NO₂、SO₂等前体物的二次转化对PM_{2.5}浓度有显著影响。

3 结论

(1) 环鄱阳湖城市群非优良天数为865 d, 占总天数的9.86%。不同城市的空气质量存在差异, 黄山空气质量最好, 宣城空气质量最差。PM_{2.5}超标天数最多, CO、NO₂、SO₂超标天数可忽略不计。AQI与PM_{2.5}相关性最显著, 且PM_{2.5}与NO₂、CO、SO₂浓度均呈显著正相关。

(2) 环鄱阳湖城市群12月污染天数最多, 1月次之, 8月污染天数最少, 6、7、9月的污染天数也较少。

(3) 环鄱阳湖城市群的春、夏、秋三季AQI变化不大, 空间分布规律并不十分显著; 冬季相比与其他三季, 空气质量状况明显处于劣势。AQI呈现环湖核心区高, 环湖上围区和环湖下围区低的分布。

(4) 影响环鄱阳湖城市群的首要污染物在不同季节存在差异, 夏季主要为O₃, 其余季节主要为PM_{2.5}。

参考文献:

[1] 邓霞君, 蔡振群, 项晓美, 等. 浙江省空气质量及主要气象因子的影响分析[J]. 环境科学与技术, 2014, 37(增刊2): 372-377.
[2] DENMAN A R, CROCKETT R, GROVES KIRKBY C, et al. The value of seasonal correction factors in assessing the health risk from domestic radon - a case study in Northamptonshire, UK[J]. Environment International, 2007, 33(1): 34-44.
[3] 白爱民. AQI vs API——新老空气质量标准之对比[J]. 环境科学导刊, 2013, 32(6): 95-97.
[4] 刘耀彬, 戴璐. 基于SNA的环鄱阳湖城市群网络结构的经济联系分析[J]. 长江流域资源与环境, 2013, 22(3): 263-271.
[5] 刘耀彬, 王英, 谢非. 环鄱阳湖城市群城市规模结构演变特征[J]. 经济地理, 2013, 33(4): 70-76.
[6] 范庆亚, 陈功勋. 上海市空气污染指数API的时空分布特征[J]. 四川环境, 2013, 32(4): 52-57.

[7] 詹长根, 吴艺, 韦淑贞, 等. 基于GIS的武汉市AQI时空分布规律研究[J]. 地理空间信息, 2014, 12(5): 62-64.
[8] 施益强, 王坚, 张枝萍. 厦门市空气污染的空间分布及其与影响因素空间相关性分析[J]. 环境工程学报, 2014, 8(12): 5406-5412.
[9] 王占山, 李云婷, 陈添, 等. 2013年北京市PM_{2.5}的时空分布[J]. 地理学报, 2015, 70(1): 110-120.
[10] 云慧, 何凌燕, 黄晓峰, 等. 深圳市PM_{2.5}化学组成与时空分布特征[J]. 环境科学, 2013, 34(4): 1245-1251.
[11] 潘耀忠, 龚道溢, 邓磊, 等. 基于DEM的中国陆地多年平均温度插值方法[J]. 地理学报, 2004, 59(3): 366-374.
[12] 马瑾, 邱兴华, 周永章, 等. 湛江市土壤有机氯农药残留状况及空间分布特征[J]. 地理学报, 2010, 65(1): 103-112.
[13] 姜成晟, 王劲峰, 曹志冬. 地理空间抽样理论研究综述[J]. 地理学报, 2009, 64(3): 368-380.
[14] 岳文泽, 徐建华, 徐丽华. 基于地统计方法的气候要素空间插值研究[J]. 高原气象, 2005, 24(6): 974-980.
[15] 赵晨曦, 王云琦, 王玉杰, 等. 北京地区冬春PM_{2.5}和PM₁₀污染水平时空分布及其与气象条件的关系[J]. 环境科学, 2014, 35(2): 418-427.
[16] 赵阳, 邵敏, 王琛, 等. 被动采样监测珠江三角洲NO_x、SO₂和O₃的空间分布特征[J]. 环境科学, 2011, 32(2): 324-329.
[17] 晏星, 马小龙, 赵文慧. 基于不同插值方法的PM₁₀污染物浓度研究[J]. 测绘, 2010, 33(4): 172-175.
[18] 戴昭鑫, 张云芝, 胡云锋, 等. 基于地面监测数据的2013~2015年长三角地区PM_{2.5}时空特征[J]. 长江流域资源与环境, 2016, 25(5): 813-821.
[19] 吴昊旻, 黄安宁, 黄旋旋. 近50年长三角地区季节的气候变化特征[J]. 中国农业气象, 2012, 33(3): 317-324.
[20] 刘耀彬, 王鑫磊, 刘玲. 基于“湖泊效应”的城市经济影响区空间分异模型及应用——以环鄱阳湖区为例[J]. 地理科学, 2012, 32(6): 680-685.
[21] 王冠岚, 薛建军, 张建忠. 2014年京津冀空气污染时空分布特征及主要成因分析[J]. 气象与环境科学, 2016, 39(1): 34-42.
[22] 刘森, 刘丽娟, 王震, 等. 基于AQI数据的大连夏季空气质量分析[J]. 大气与环境光学学报, 2016, 11(2): 111-117.
[23] STEPHENS S, MADRONICH S, WU F, et al. Weekly patterns of Mexico City's surface concentrations of CO, NO_x, PM₁₀ and O₃ during 1986-2007[J]. Atmospheric Chemistry & Physics, 2008, 8(17): 5313-5325.

编辑: 徐婷婷 (收稿日期: 2017-12-18)

