

基于 ESDA 的太湖流域空气质量 时空异质性分析

陆道平

(苏州科技大学 人文社科处, 江苏 苏州 215009)

【摘要】: 以长三角核心区域——太湖流域为研究对象, 对其 2014—2018 年空气质量进行了时空异质性分析, 并利用相关性分析探索了太湖流域空气质量驱动机制。结果表明: (1) 太湖流域空气质量的总体空间差异较小, 流域东部沿海沿江地区以及西南部山林区域的空气质量普遍较好。上海、嘉兴两市空气质量相对较好, 无锡、镇江两市则较差, 局部聚集性尚不明显; (2) 自然生态空间、污染治理技术及协同治理对策可使城市在经济社会发展的同时实现空气质量的稳步改善。最后结合流域实际针对性提出了相适应的对策建议。

【关键词】: ESDA 太湖流域 绿色发展

【中图分类号】: X51 **【文献标识码】:** A **【文章编号】:** 1671-4407(2021)04-194-07

作者简介: 陆道平, 博士, 教授, 研究方向为公共管理与政府治理。E-mail: 286103870@qq.com

基金项目: 国家社会科学基金重点项目“我国雾霾治理的政策工具组合与优化研究”(17AZZ008)

改革开放 40 余年以来, 我国社会经济取得举世瞩目的辉煌成就, 人民生活水平显著提升。然而, 发展的背后却也隐藏诸多隐患, 其中, 大气污染已成为突出问题和治理焦点^[1]。2013 年年初, 我国发生了全国范围内持续性大面积严重雾霾天气, 被认为是我国自 20 世纪以来最为严重的大气污染事件, 此后雾霾等空气污染事件时有发生, 大气污染治理成为关系高质量发展和人民美好生活需要的时代之需^[2]。2013 年, 国务院印发《大气污染防治行动计划》, 指导各省份开展大气污染防治工作。2018 年, 习近平总书记在全国生态环境保护大会上强调: “解决突出生态环境问题作为民生优先领域, 坚决打赢蓝天保卫战是重中之重。”党的十九大报告指出要: “坚持全民共治、源头防治, 持续实施大气污染防治行动, 打赢蓝天保卫战。”流域尺度下的大气污染演化进程呈明显的区域性、复合性和累积性特征, 有效治理的难度陡然增大。长三角城市群是全国雾霾污染最严重的地区之一, 2013—2018 年全区域城市平均雾霾污染超标天数占比高达 27.07%, 呈现出发生频率高、影响范围广、治理难度大等特点^[3-5]。太湖流域位于长三角城市群核心区域, 涵盖上海、苏州、杭州等主要城市, 人口密度大且社会经济发展水平高。与此同时, 大规模工业生产和庞大机动车保有量, 使得流域内由氮氧化物、烟粉尘、SO₂、CO 等来源引起的光化学污染以及细颗粒物污染问题凸显^[6-8], 直接影响到流域践行“两山”理论、实现高质量发展的新时代目标。近年来, 国内外学者们对空气质量开展了许多卓有成效的研究和探索, 主要涉及以下几个方面: (1) 不同尺度、不同标准体系下的空气质量评估^[9-11]; (2) 时空维度下空气污染分布与扩散特征研究^[12-15]; (3) 空气质量影响机制分析^[16-18]; (4) 空气污染治理技术与对策研究^[19-20]。综合梳理发现, 现有研究鲜有分析较大范围区域空气污染问题, 且所用数据多以静态面板数据或短期截面数据为主, 在全面揭示区域空气质量时空特征方面尚有欠缺。由于多地空气污染程度的加深, 以及空气污染交叉转移扩散的加剧, 厘清空气质量与社会经济发展间耦合关系和空间化分析成为前沿热点^[21-24]。本文基于探索性空间数据分析法(exploratory spatial data analysis, ESDA)对太湖流域 2014—2018 年空气质量指数(air quality index, AQI)进行了时空异质性分析, 并揭示了太湖流域空气质量影响因素驱动机

制，以期为太湖流域大气治理体系与治理能力现代化提供决策参考。

1 材料与方法

1.1 太湖流域概况

太湖流域位于我国长江经济带东端的长三角城市群核心区域(图 1)，行政区划分属江苏、浙江、安徽以及上海三省一市，总面积达 36895km²，属亚热带季风气候区，四季分明，雨热丰沛，河网如织，湖泊棋布。太湖流域综合性区位与战略优势显著，已发展成为我国人口密度最大、工农业生产最发达、大中城市最密集、国内生产总值和人均收入增长最快的地区之一。2018 年，太湖流域总人口 6104 万人，占全国的 4.4%，地区国内生产总值 87663 亿元，占全国的 9.7%，人均国内生产总值 14.4 万元，是全国平均水平的 2.2 倍。在经济社会高速发展的同时，太湖流域空气质量问题愈发凸显，臭氧(O₃)、细颗粒物(PM)以及 NO₂为主要污染物，流域内多数城市该类污染物浓度未达国家二级标准，空气污染治理成为流域综合治理的关键组成。

1.2 空气质量衡量标准及数据来源

我国环境空气质量标准于 1982 年首次发布，随着经济社会发展水平和空气污染复杂性的提升，在 1996 年和 2000 年分别经历两次修订，但随着经济社会的快速发展以及机动车保有量的迅速增加，环境污染特征也不断变化，在可吸入颗粒物(PM₁₀)和总悬浮颗粒物(TSP)污染还未全面解决的情况下，可入肺颗粒物 PM_{2.5}和臭氧污染加剧，导致雾霾、灰霾现象频发，严重影响了人们的生存环境，为了适应环境保护的新要求，我国于 2012 年颁布实施《环境空气质量标准》(GB3095—2012)。为了配合《环境空气质量标准》的修订，我国环保部也开展了《环境空气质量指数(AQI)日报技术规定》的制定工作。与原来相关环境空气质量标准的规定相比，首先将环境空气污染指数(API)改为环境空气质量指数(AQI)，与国际标准名称一致。

AQI 是反映大气环境质量水平的权威指标，它是根据《环境空气质量标准》和各项污染物对人体健康及生态环境的影响，将 PM₁₀、PM_{2.5}、SO₂、NO₂、O₃和 CO 等空气污染物浓度折算成的单一、无量纲的概念性指数。AQI 将空气污染程度和空气质量状况分级表示，适用于表示城市短期空气质量状况和变化趋势。因此，本文采用 AQI 作为衡量流域空气质量的指标，AQI 数值越大，表明综合污染程度越重，城市空气质量越差。具体根据《环境空气质量指数(AQI)技术规定(试行)》(HJ633—2012)规定，AQI 数值大小可分为以下 6 级：0~50，空气质量状况为优；51~100，空气质量状况为良；101~500，空气质量状况为轻度污染；151~200，空气质量状况为中度污染；201~300，空气质量状况为重度污染；AQI 大于 300，空气质量状况为严重污染。

本文中 AQI 数据主要来源包括太湖流域内各城市 2014—2018 年生态环境公报、流域内相关部委和监测站点公布数据，以及部分文献数据。

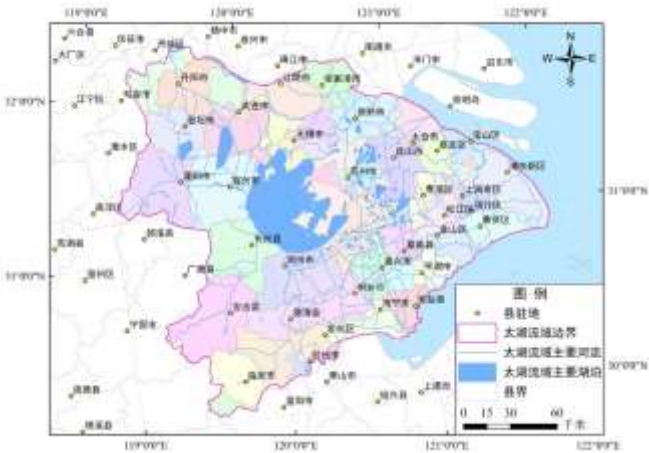


图 1 太湖流域概况下载原图

1. 3AQI 空间分析模型

本文首先根据收集整理的 AQI 数据，基于克里金插值法，利用 ArcGIS 软件得到太湖流域 2014—2018 年 AQI 空间分布情况。进而，为获取流域空气质量更具化的空间分布特征，采用 ESDA 法^[25-26]，从全局和局部两个层面对太湖流域多年度 AQI 进行空间分析。

(1) 全局空间自相关分析。

全局空间自相关分析旨在衡量研究对象整体上的空间关联与空间差异程度，用 Global Moran' sI 统计量作为度量指标，计算公式为：

$$I = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n W_{ij} (Y_i - \bar{Y})(Y_j - \bar{Y})}{S^2 \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n W_{ij}} \quad (1)$$

式中： $S^2 = \frac{1}{n} \sum (Y_i - \bar{Y})^2$ ，表示 AQI 值的方差，n 为地区总数。 W_{ij} 是标准化的空间邻接权重矩阵，选取基于共同边界的一阶 Rook 权重，当地区 i 与 j 相邻时， $W_{ij}=1$ ，否则为 0。 Y_i 表示区域 i 的 AQI 值， $\bar{Y}$ 表示研究区域 AQI 平均值。对于 I 值，若为正，表明变量在空间上的相似性，若为负，则表明不相似性。

经 Moran' sI 指数的显著性检验，在给定置信水平时，若 Moran' sI 显著且正，则表示空气污染较大的地区在空间上集聚，值越趋近于 1，流域空气质量的总体空间差异越小。若 Moran' sI 显著且负，则表明地区间的空气质量水平具有显著的差异，值越接近-1，流域空气质量的总体空间差异越大。

(2) 局部空间自相关分析。

局部空间自相关分析通过测算空间关联局域指标显著性水平来反映各个地区与周边地区之间的空间差异程度及显著性，常用散点图和 Local Moran' sI 统计量来度量，计算公式为：

$$I_i = z_i \sum_j \omega_{ij} z_j \quad (2)$$

式中： z_i 、 z_j 是标准化的观测值， ω_{ij} 是空间权重，其中， $\sum_j \omega_{ij} = 1$ 。在给定置信水平下，若 I_i 显著，为正，且 $z_i > 0$ ，则区域 i 位于 HH 象限（高一高，表示高污染地区被高污染地区包围）。若 I_i 显著，为正，且 $z_i < 0$ ，则区域 i 位于 LL 象限（低—低，表示低污染地区被低污染地区包围）。若 I_i 显著，为负，且 $z_i > 0$ ，则区域 i 位于 HL 象限（高一低，表示高污染地区被低污染地区包围）。若 I_i 显著，为负，且 $z_i < 0$ ，则区域 i 位于 LH 象限（低—高，表示低污染地区被高污染地区包围）。

1. 4AQI 驱动机制分析

为深入剖析太湖流域空气质量演化规律的成因，本文构建 AQI 驱动因子体系，通过相关性拟合分析，得到不同驱动因子对太湖流域 AQI 的影响特征。利用文献梳理法、频次统计法，结合太湖流域实际，从社会、经济及生态三个方面确定了 AQI 驱动

因子体系，具体见表 1。

表 1AQI 驱动因子体系

空气质量指数 (AQI)	社会因子	人口密度/(人/平方千米)
		城镇化率/%
	经济因子	人均国内生产总值/(万元/人)
		人均汽车拥有量/(辆/人)
		单位规模以上工业总产值能耗/(吨标准煤/元)
	生态因子	工业氮氧化物排放量/万吨
		工业烟(粉)尘排放量/万吨
		建成区绿化覆盖率/%
		林木覆盖率/%

2 结果与分析

2.1 太湖流域 AQI 时序演化

通过整理统计年鉴、监测与相关公报数据，本文获取太湖流域内苏州、无锡、常州、镇江、上海、杭州、嘉兴和湖州 8 个主要城市 2014—2018 年的 AQI 时序演化情况，见表 2。

表 2 太湖流域 AQI 时序演化

城市	2014 年		2015 年		2016 年		2017 年		2018 年	
	AQI	排名	AQI	排名	AQI	排名	AQI	排名	AQI	排名
苏州	95.08	5	91.25	4	86.60	5	85.38	4	80.42	3
无锡	100.42	8	94.58	7	90.32	8	88.94	6	80.66	5
常州	97.67	7	94.08	6	89.58	7	89.49	7	91.39	8
镇江	96.25	6	97.17	8	84.41	4	94.59	8	88.72	7
上海	80.33	1	88.50	2	80.79	1	83.55	1	74.26	1
杭州	90.33	2	87.33	1	85.53	3	85.12	3	80.66	4
嘉兴	90.75	3	90.83	3	81.74	2	84.61	2	79.38	2

湖州	94.17	4	93.67	5	88.92	6	87.87	5	81.46	6
平均值	93.13		92.18		85.99		87.44		82.12	

可见，太湖流域内 8 个主要城市 2014—2018 年空气质量整体上处于良好等级且呈现向好趋势。具体来看，AQI 平均值存在一定波动，2014—2016 年逐年下降，2017 年稍有反弹，2018 年转而上升，2014—2018 年均下降 2.36%。从城市 AQI 年均值角度来看，上海相较表现最好，连续 5 年 AQI 年均值均在 90 以下，常州、无锡的空气质量则较差，其中，无锡市 2014 年 AQI 年均值达 100.42，为最高值。从年际变化来看，苏州、无锡、杭州、湖州的空气质量逐年改善，无锡尤为显著，AQI 下降率达到 19.68%，上海、嘉兴空气质量先降后升，常州先升后降，镇江则处于升降交替状态。综合可见，太湖流域内城市空气质量存在时空差异，有必要进一步量化分析其特征。

2.2 太湖流域 AQI 空间分布

利用克里金插值得到太湖流域 2014—2018 五个年度 AQI 空间分布图(图 2)。可以看出，太湖流域东部沿海沿江地区以及西南部山林区域的空气质量普遍较好，而流域西北部区域则相对较差。

进一步利用 ESDA 法得到太湖流域 AQI 全局与局部的空间分布特征。首先，太湖流域 AQI 的全局 Moran' sI 在 2014—2018 年内保持在 0.25~0.35 区间，且显著性检验通过(P 值均小于 0.1)，见表 3，因此，太湖流域 AQI 在研究期内存在显著的空间聚集特征，流域空气质量的总体空间差异较小。

表 3 太湖流域 AQI 全局 Moran' sI 指数

年份	Moran' sI	z-score	P-value
2014	0.2388	1.8463	0.0649<0.10
2015	0.3371	2.0842	0.0371<0.05
2016	0.2591	1.7679	0.0771<0.10
2017	0.3507	2.4337	0.0149<0.05
2018	0.3472	2.3137	0.0207<0.05

继续进行太湖流域 AQI 局部空间自相关分析。太湖流域 AQI 的局部 Moran' sI 见表 4，冷热点分布见图 3。可见，2015 年的无锡和 2018 年的镇江成为当年度的高污染地区“包围圈”，说明上述城市及其周边地区在当年度内空气质量整体交差。从时序角度来看，2014—2017 年，上海与嘉兴多为流域 AQI 冷点区，即 AQI 低值区，表明该区域空气质量相对较好，而无锡、常州、镇江在研究期内多为 AQI 热点区，即 AQI 高值区，表明该区域空气质量相对较差。从格局演变上来看，AQI 低值区域逐年向上海周边地区辐射，而 AQI 高值区冷点则逐年由无锡向常州向镇江转移，其中，镇江的局部集聚更为显著。总体而言，太湖流域 AQI 的局部集聚性尚不明显。

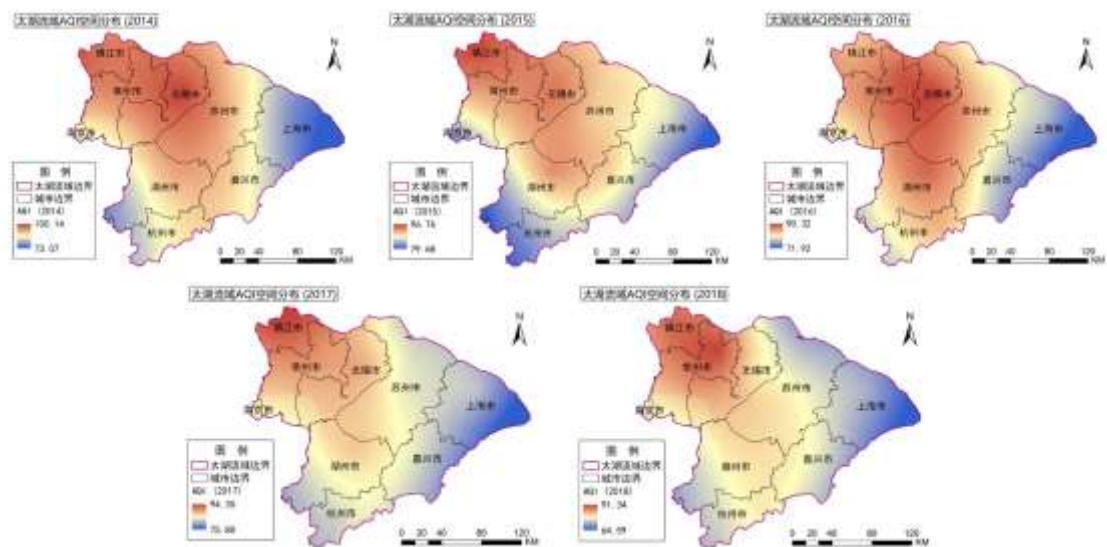


图 2 太湖流域 AQI 空间分布

表 4 太湖流域 AQI 的局部 Moran' sI 指数

年份	地区	LMiIndex	LMiZScore	LMiPValue	Type
2014	苏州	-0.12	0.26	0.80	
	无锡	0.36	0.54	0.59	
	常州	1.14	1.12	0.26	
	镇江	0.47	0.62	0.54	
	上海	0.91	0.99	0.32	
	杭州	0.34	0.51	0.61	
	嘉兴	1.35	1.27	0.20	
	湖州	0.01	0.35	0.72	
2015	苏州	0.31	0.55	0.59	
	无锡	0.27	0.45	0.65	
	常州	1.38	1.24	0.21	
	镇江	1.92	1.73	0.08	
	上海	1.13	1.10	0.27	
	杭州	0.28	0.42	0.67	
	嘉兴	1.50	1.35	0.18	

	湖州	-0.65	-0.10	0.92	
2016	苏州	-0.11	0.33	0.74	
	无锡	2.45	2.09	0.04<0.05	HH
	常州	0.78	0.86	0.39	
	镇江	-0.45	-0.32	0.75	
	上海	1.49	1.43	0.15	
	杭州	0.05	0.27	0.79	
	嘉兴	0.71	0.91	0.36	
	湖州	0.06	0.45	0.65	
2017	苏州	0.77	0.96	0.34	
	无锡	0.05	0.36	0.72	
	常州	1.37	1.43	0.15	
	镇江	1.13	1.46	0.14	
	上海	1.47	1.52	0.13	
	杭州	0.43	0.62	0.53	
	嘉兴	1.72	1.64	0.10	
	湖州	-0.19	0.27	0.78	
2018	苏州	0.73	0.93	0.35	
	无锡	-0.34	0.06	0.95	
	常州	1.62	1.60	0.11	
	镇江	2.08	2.46	0.01<0.05	HH
	上海	1.18	1.24	0.22	
	杭州	0.17	0.38	0.70	
	嘉兴	1.08	1.18	0.24	
	湖州	0.16	0.53	0.60	

2.3 太湖流域 AQI 驱动机制分析

受限于统计口径和数据可得性，本文选取太湖流域内苏州、无锡、常州、镇江为分析对象，根据表 1 收集整理了这 4 个城

市 2014—2018 年的人口密度(X_1)、城镇化率(X_2)、人均国内生产总值(X_3)、人均汽车拥有量(X_4)、单位规模以上工业总产值能耗(X_5)、工业氮氧化物排放量(X_6)、工业烟(粉)尘排放量(X_7)、建成区绿化覆盖率(X_8)及林木覆盖率(X_9)共 9 项指标统计数据, 见表 5。

表 5 太湖流域苏锡常镇四市 AQI 驱动因子(2014—2018 年)

地区	年份	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7	X_8	X_9
苏州	2014	1249.00	73.95	12.99	0.23	0.273	16.70	7.16	42.93	20.40
	2015	1226.00	74.90	13.67	0.25	0.272	13.97	7.54	43.08	20.59
	2016	1230.00	75.50	14.56	0.29	0.276	11.88	6.18	42.66	20.69
	2017	1234.00	75.80	16.21	0.33	0.270	10.38	4.77	42.15	20.76
	2018	1238.00	76.05	17.35	0.36	0.261	9.24	3.97	42.27	20.85
无锡	2014	1031.00	74.47	12.64	0.19	0.253	10.71	4.32	42.90	26.60
	2015	1039.00	75.40	13.09	0.22	0.242	9.78	8.29	43.00	26.84
	2016	1410.93	75.80	14.40	0.24	0.263	8.37	6.76	43.00	26.99
	2017	1416.11	76.00	16.07	0.27	0.250	7.27	5.78	43.00	27.28
	2018	1420.76	76.30	17.43	0.29	0.242	6.18	5.29	43.00	27.66
常州	2014	1074.00	68.70	10.44	0.19	0.151	5.84	11.51	43.00	24.06
	2015	1075.00	70.00	11.22	0.21	0.154	5.85	9.80	43.10	25.48
	2016	1077.00	71.00	12.49	0.23	0.145	5.40	5.75	43.13	25.88
	2017	1079.00	71.80	14.04	0.26	0.159	5.18	5.49	43.10	26.19
	2018	1082.00	72.50	14.93	0.28	0.161	4.59	3.23	43.12	26.41
镇江	2014	825.89	66.60	10.27	0.12	0.17	5.34	2.65	42.50	26.84
	2015	827.21	67.90	11.04	0.13	0.15	4.29	2.53	42.80	25.02
	2016	828.46	69.20	12.27	0.15	0.24	3.99	2.09	42.90	24.97
	2017	829.77	70.50	12.60	0.17	0.29	1.74	0.70	43.00	25.00
	2018	832.40	71.20	12.69	0.19	0.42	1.26	0.60	43.10	25.06

通过绘制其与 AQI 的散点图并进行相关性拟合, 见图 4。综合分析可知:

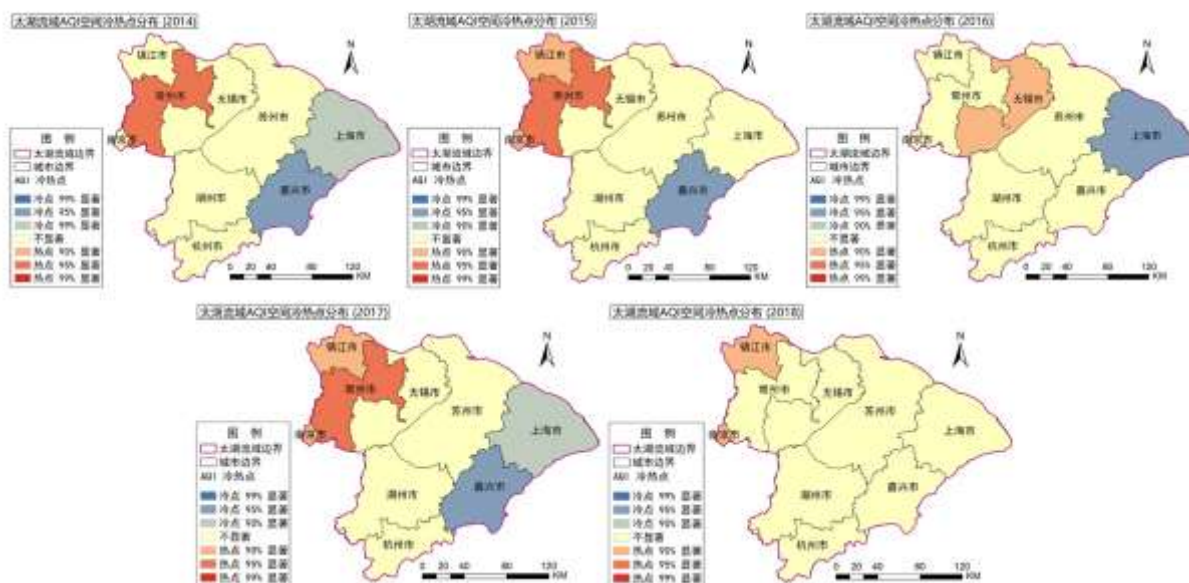


图 3 太湖流域 AQI 冷热点分布

(1) 对苏州、无锡、常州而言，城镇化率、人均国内生产总值、人均汽车保有量、建成区绿化覆盖率以及林木覆盖率与 AQI 之间存在较为显著的负相关，意味着上述驱动因子值越大，AQI 指数越小，空气质量越高。此情形可细分为两类：一是建成区绿化覆盖率以及林木覆盖率越高，则空气净化能力越高，使得空气质量得以提升。二是城镇化率、人均国内生产总值及人均汽车保有量与 AQI 之间呈现负相关的“矛盾”，主要是由于苏锡常三市近年来的发展过程中对空气污染治理重视程度快速提升，治理政策及技术使得这 3 个城市在社会经济发展的同时，空气污染治理初步成效显现。

(2) 对苏州、无锡、常州而言，工业氮氧化物排放量及工业烟(粉)尘排放量与 AQI 之间存在较为显著的正相关。说明工业氮氧化物排放量及工业烟(粉)尘排放量两项指标的上升，导致了 AQI 值的明显上升，这与这 3 个城市目前主要污染物为氮氧化物和细颗粒物较为吻合。

(3) 人口密度、单位规模以上工业总产值能耗两驱动因子以及镇江市的表现均未呈现显著的相关性，主要原因为影响 AQI 值的驱动因子不止本文遴选的 9 个，2014—2018 年，研究对象城市的 AQI 波动由本文未考虑的因子影响，因此，未能形成连贯的相关性。

3 结论

3.1 主要结论

(1) 流域空气质量整体处于良好等级且有向好趋势。流域空气质量的总体空间差异较小，流域东部沿海沿江地区以及西南部山林区域的空气质量普遍较好。上海、嘉兴空气质量相对较好，无锡、镇江则较差，局部聚集性尚不明显。

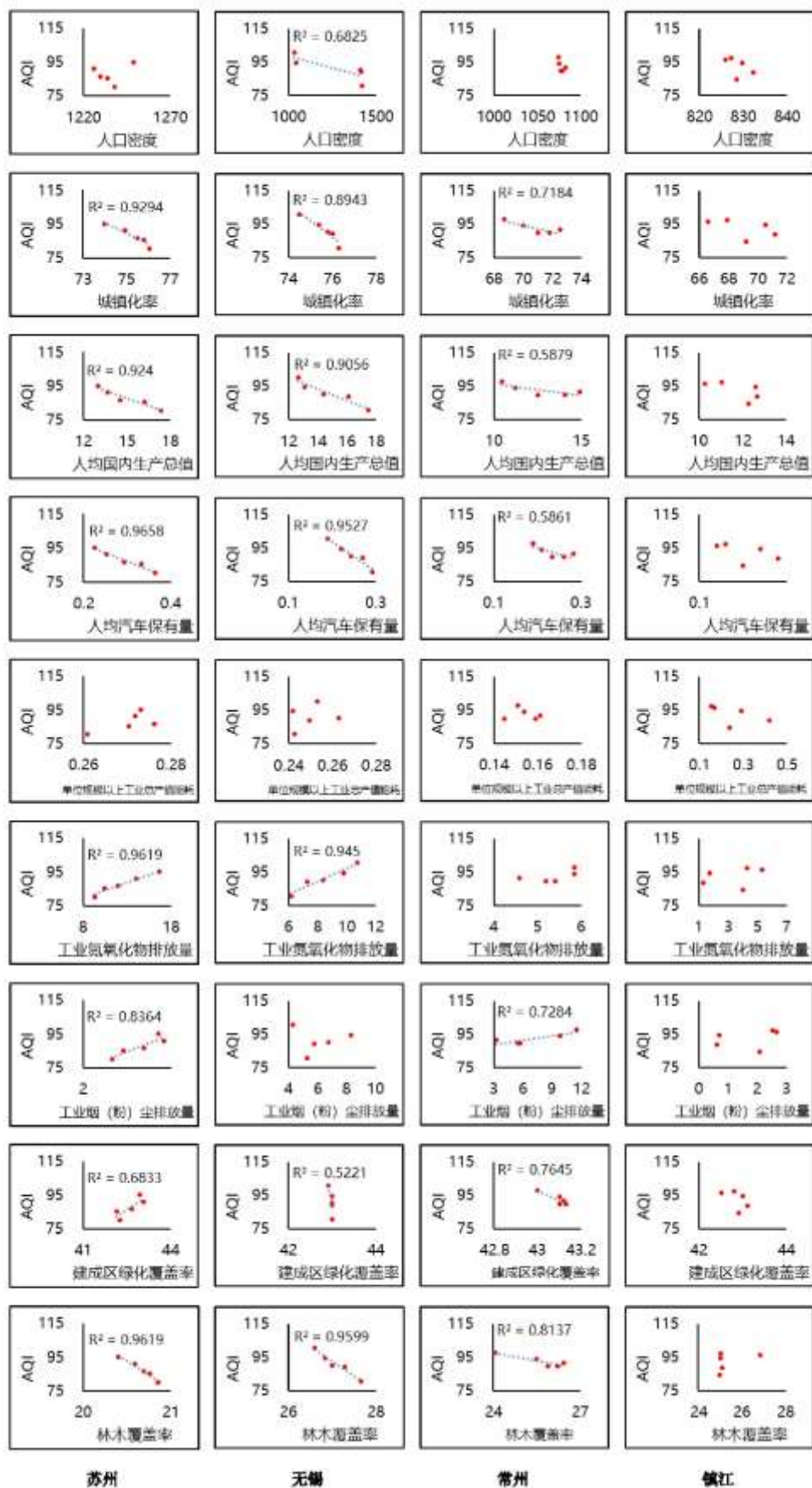


图 4 太湖流域苏锡常镇四市 AQI 驱动因子相关性散点图（2014—2018 年）

(2)对苏州、无锡、常州而言，城镇化率、人均国内生产总值、人均汽车保有量、建成区绿化覆盖率以及林木覆盖率与 AQI 之间存在较为显著的负相关，工业氮氧化物排放量及工业烟(粉)尘排放量与 AQI 之间存在较为显著的正相关。自然生态空间、污染治理技术及协同治理对策可使城市在经济社会发展的同时实现空气质量的稳步改善。

3.2 对策建议

(1)太湖流域内各城市空气质量存在明显的空间差异性，且各自的时序演化规律也不同，加上空气污染的无界性特征，要求流域必须采取一体化治理模式。太湖流域应抢抓长三角区域一体化发展上升为国家战略的历史机遇，完善太湖流域内城市间大气污染治理的协商决策体系，利用建立联防联控机制，形成流域一体化打赢蓝天保卫战的制度基础。

(2)工业生产制造所造成的污染气体排放是影响太湖流域空气质量的主要因素。太湖流域应坚持生态优先、绿色发展理念，加快产业结构转型升级，积极发展高新技术产业，限制高能耗、高污染产业发展。推广使用清洁能源，最严格控制工业污染源排放，推进绿色生产。

(3)太湖流域西南部山林地带空气质量明显较好，体现了自然生态空间对空气质量提升存在一定的促进作用。太湖流域应合理规划城市生态空间格局，通过生态公园、生态廊道建设等形式适当增加城市绿色空间，修复提升空气自净能力。

(4)太湖流域人口密集，频繁的生活行为对空气质量影响较大。太湖流域应提倡绿色消费观和生活习惯，树立全民共担大气环境保护责任的认识。

参考文献:

- [1]李小飞, 张明军, 王圣杰, 等. 中国空气污染指数变化特征及影响因素分析[J]. 环境科学, 2012(6): 1936-1943.
- [2]林楚海. 中国雾霾污染的空间计量分析[J]. 统计与决策, 2018(16): 94-99.
- [3]刘冬惠, 张海燕, 毕军. 区域大气污染协作治理的驱动机制研究——以长三角地区为例[J]. 中国环境管理, 2017(2): 73-79.
- [4]杨传明, Horvath G. 时空交互视角下长三角城市群雾霾污染动态关联网络及协同治理研究[J]. 软科学, 2019(12): 118-124.
- [5]陈优良, 陶天慧, 丁鹏. 长江三角洲城市群空气质量时空分布特征[J]. 长江流域资源与环境, 2017(5): 687-697.
- [6]孙丹丹, 杨书运, 王体健, 等. 长三角地区城市 O₃ 和 PM_{2.5} 污染特征及影响因素分析[J]. 气象科学, 2019(2): 164-177.
- [7]程钟. 苏南城市空气质量污染特征及趋势分析研究[J]. 环境科学与管理, 2017(3): 134-138.
- [8]王昂扬, 潘岳, 童岩冰. 长三角主要城市空气污染时空分布特征研究[J]. 环境保护科学, 2015(5): 131-136.
- [9]刘智强, 杨竞宪, 周游, 等. 常州市 2014—2016 年空气质量管理水平评估与分析[J]. 环境科学导刊, 2018(4): 16-21.

-
- [10]杨晓艳, 鲁红英. 基于模糊综合评判的城市环境空气质量评价[J]. 中国人口·资源与环境, 2014(S2): 143-146.
- [11]Gorai A K, Upadhyay K A, Goyal P. Design of fuzzy synthetic evaluation model for air quality assessment[J]. Environment Systems and Decisions, 2014, 34(3): 456-469.
- [12]杨蓉, 王淑云, 雷林, 等. 基于 ESDA 的省域空气污染空间特征研究[J]. 环境科学与管理, 2016(12): 16-19.
- [13]娄彩荣. 长三角核心区 PM_{2.5} 多尺度时空特征及其影响机制研究[D]. 南京: 南京师范大学, 2018.
- [14]Song Y S, Wang X K, Maher B A, et al. The spatial-temporal characteristics and health impacts of ambient fine particulate matter in China[J]. Journal of Cleaner Production, 2016, 112: 1312-1318.
- [15]Zheng Z F, Xu G R, Yang Y J, et al. Statistical characteristics and the urban spillover effect of haze pollution in the circum-Beijing region[J]. Atmospheric Pollution Research, 2018, 9(6): 1062-1071.
- [16]宁自军, 隗斌贤, 刘晓红. 长三角雾霾污染的时空演变及影响因素——兼论多方主体利益诉求下地方政府雾霾治理行为选择[J]. 治理研究, 2020(1): 82-92.
- [17]左芝鲤, 郭海湘, 成金华. 长江经济带空气质量影响因素研究[J]. 环境经济研究, 2018(4): 150-167.
- [18]刘昕, 辛存林. 陕甘宁地区城市空气质量特征及影响因素分析[J]. 环境科学研究, 2019(12): 2065-2074.
- [19]李培, 王新, 柴发合, 等. 我国城市大气污染控制综合管理对策[J]. 环境与可持续发展, 2011(365): 8-14.
- [20]王俊, 陈柳钦. 我国能源消费结构转型与大气污染治理对策[J]. 经济研究参考, 2014(50): 32-39.
- [21]王寿兵, 汪远安, 马小雪. 近十几年上海空气质量变化动态及主要污染指标间的相关性分析[J]. 复旦学报(自然科学版), 2015(2): 229-233.
- [22]柏玲, 姜磊, 周海峰, 等. 长江经济带空气质量指数时空异质性及社会经济影响因素分析[J]. 水土保持研究, 2019(2): 312-319.
- [23]周贤梅, 郭炎明, 白承晔. 空气环境与经济发展共赢之路探究——以苏州市为例[J]. 产业与科技论坛, 2019(20): 83-85.
- [24]Ferrero E, Alessandrini S, Balanzino A. Impact of the electric vehicles on the air pollution from a highway[J]. Applied Energy, 2016, 169: 450-459.
- [25]谭永滨, 蔡联斌, 何思宇, 等. 2015—2016 年长江经济带空气质量状况时空分析[J]. 江西科学, 2018(6): 79-83.
- [26]姜颀月, 闫亚琛, 李海蓉. 中国 2013 年城市大气污染现状及探索性空间数据分析[J]. 安全与环境学报, 2016(2): 352-357.