

DOI:10.11705/j.issn.1672-643X.2020.01.02

“中四角”工业废水排放时空格局演变及其重心迁移研究

胡绵好¹, 赵蕾², 袁菊红³, 陈拉¹

(1. 江西财经大学 生态文明研究院, 江西 南昌 330013; 2. 江西财经大学 旅游与城市管理学院, 江西 南昌 330013; 3. 江西财经大学 艺术学院, 江西 南昌 330013)

摘要: 基于探索性空间分析(ESDA)方法和重心迁移模型研究2006–2017年“中四角”工业废水排放的时空格局演变及其重心迁移轨迹。研究结果表明:2006–2017年“中四角”工业废水排放整体呈下降趋势,并存在明显空间分异特征,呈西南从高到低、中东从低到高的演变规律;总体空间内无明显的空间集聚特征,但局部空间存在明显的集聚特征且以低高集聚状态为主;2006–2017年间“中四角”工业废水排放重心主要在东经114.38°E~114.95°E、北纬29.18°N~29.34°N区域内移动,总体向东北方向移动,移动总距离为107.88 km;“中四角”工业总产值重心总体向西北方向移动,移动总距离为94.39 km,除2011和2012年外其他年份的重心移动距离变化较小。2006–2017年间“中四角”工业总产值重心逐渐偏离几何中心,而工业废水排放重心逐渐向几何中心靠拢且移动速度明显高于工业总产值重心移动速度。

关键词: 工业废水排放; 时空格局; 重心迁移; “中四角”

中图分类号: X322 文献标识码: A 文章编号: 1672-643X(2020)01-0006-08

Spatial-temporal pattern evolution of industrial wastewater discharge and its barycenter migration in “Four-city Area in Middle China”

HU Mianhao¹, ZHAO Lei², YUAN Juhong³, CHEN La¹

(1. Institute of Ecological Civilization, Jiangxi University of Finance and Economics, Nanchang 330013, China;
2. School of Tourism and Urban Management, Jiangxi University of Finance and Economics, Nanchang 330013, China;
3. College of Art, Jiangxi University of Finance and Economics, Nanchang 330013, China)

Abstract: This paper analyzed the spatial-temporal pattern evolution of industrial wastewater discharge and its barycenter migration in “Four-city Area in Middle China” from 2006 to 2017, based on Exploratory Spatial Data Analysis (ESDA) method and barycenter migration model. The results showed that the industrial wastewater discharge in “Four-city Area in Middle China” decreased in the studied period, and had obvious spatial differentiation characteristics. Moreover, it showed an evolution law from high to low in the Southwest and from low to high in the Middle East. There was no obvious spatial agglomeration feature in the overall space, but an obvious agglomeration feature in certain local places with low agglomeration in the center and high agglomeration in the surrounding cities. The barycenter of industrial wastewater discharge in “Four-city Area in Middle China” from 2006 to 2017 moved only in the region of 114.38°E–114.95°E east longitude and 29.18°N–29.34°N latitude, and generally moved in the northeast direction, with a total distance of 107.88 km. The barycenter of gross value of industrial output in “Four-city Area in Middle China” generally moved to the northwest, with a total moving distance of 94.39 km, and the moving distance of the barycenter changed little except for 2011 and 2012. From

收稿日期:2019-08-24; 修回日期:2019-09-29

基金项目: 国家自然科学基金项目(21407069、21367013、71463020); 江西省自然科学基金项目(20142BAB203024、20151BAB203034); 江西省教育厅科技项目(GJJ180265)

作者简介: 胡绵好(1976-),男,湖南麻阳人,博士后,副教授,硕士生导师,研究方向为区域水环境污染控制经济学和水资源经济学。

2006 to 2017, the barycenter of gross value of industrial output in “Four-city Area in Middle China” gradually deviated from the geometric center, while the barycenter centers of industrial wastewater discharge gradually converged to the geometric center, and its moving speed was significantly higher than that of the barycenter of gross value of industrial output.

Key words: industrial wastewater discharge; spatial-temporal pattern; barycenter migration; “Four-city Area in Middle China”

1 研究背景

随着城市化的发展,城市水环境污染问题日渐突出,而水环境污染的主要来源为工业废水和生活废水^[1]。在水资源严重匮乏和水污染日益加剧的情况下,工业废水因具有排放量大、处理集中的特征已成为节能减排和水环境治理的重点管控对象^[2]。随着城市化进程加快和城市规模的扩大,工业产业的区位随之转变,工业废水排放格局也正发生变化。一方面由于我国在“十一五”和“十二五”期间大力推进环境治理,化学需氧量、氨氮等污染物排放总量趋于减少;另一方面,随着部分制造业开始从沿海地区向中西部地区转移^[3-6],导致制造业的分布格局发生变化,这直接影响到工业水污染排放的空间格局。据国家环保部统计,2007年至2014年,东部地区工业废水排放量占全国的比重从49.74%下降到48.82%,中部地区工业废水排放量占全国的比重从20.74%上升到23.16%,西部地区工业废水排放量占全国的比重从22.49%下降到19.50%。虽然对工业污染物排放的空间认知及重心迁移是制定环境污染控制和区域发展规划的科学基础^[7],但目前的环境统计还不能提供分区域城市工业的污染物排放数据,故不能可视区域城市工业污染物排放的空间格局及其重心迁移演变情况。鉴于此,采用ESDA方法、GIS技术和重心空间模型,分析“中四角”35个城市工业废水排放的时空特征及其重心迁移特征,明确城市群内工业废水排放联防联控重点区域,为防控策略的进一步优化和完善提供切实可行的对策建议,亦为进一步探究工业废水排放重心迁移机理提供科学支撑。

2 研究区概况

“中四角”(即长江中游城市群)是以武汉、长沙、南昌、合肥四大城市为中心的超特大城市群组合(图1),国土面积约 $31.7 \times 10^4 \text{ km}^2$,拥有超过 1.2×10^8 人口,分别约占全国的3.3%、8.8%。2015年4月5日国务院批复实施《长江中游城市群发展规划》,这是继《国家新型城镇化规划(2014-2020年)》出台后的首个跨区域城市群规划,是全方位深化改革开放、促进中部地区崛起战略和推进新型城

镇化的重点区域。2018年“中四角”GDP达80057 $\times 10^8$ 元,人均GDP达 10.48×10^4 元,远高于中部地区的平均水平,整体保持平稳增长的趋势。

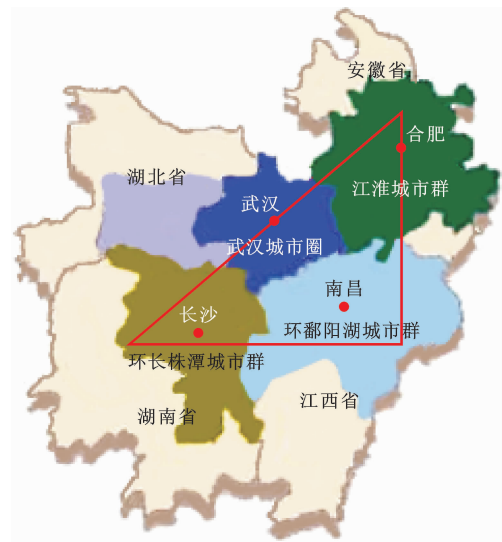


图1 “中四角”示意图

“中四角”规模以上工业企业众多,均占各省规模以上工业企业总数的六成以上^[8],因工业废水排放行业集中度高且排放强度较大,从而导致各城市在废水排放总量控制及其处理方面差异较大。在城市水环境保护与工业发展的双重压力下,“中四角”只有加强各城市联动合作^[8],建立统一的生态保护标准和污水排放标准,联合制定长江中游水环境保护规划,来共同解决目前所面临经济发展和水生态环境保护的难题。

3 研究方法 with 数据来源

3.1 研究方法

3.1.1 ESDA方法 空间自相关(Spatial Autocorrelation)分析是探索性空间分析(ESDA)方法的重要内容,是研究某一区域属性时空格局演变的常用方法^[9],通常用Moran's *I*指数来表示,包括全域型和区域型两种。

(1)全局型(Global Spatial Autocorrelation)。该指数用于描述某一属性在总体空间内是否存在集聚性状态^[10],计算公式为:

$$I = \frac{n \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n W_{ij} (x_i - \bar{x})(x_j - \bar{x})}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n W_{ij} (x_i - \bar{x})^2} \quad (1)$$

式中:全局莫兰指数用 I 表示; n 为“中四角”城市总个数; x_i 为“中四角”城市 i 的工业废水排放量, t/a ; x_j 为“中四角”城市 j 的工业废水排放量, t/a ; \bar{x} 为某年“中四角”各城市工业废水排放量平均值, t/a ; W_{ij} 为通过最近邻分类法计算得到的空间权重矩阵。 I 值为 $[-1, 1]$, 当 $0 < I < 1$ 时, 表明“中四角”各城市工业废水排放量存在空间正相关关系, 即“中四角”各城市工业废水排放量呈空间集聚状态; 当 $-1 < I < 0$ 时, 表明“中四角”各城市工业废水排放量存在空间负相关关系, 即“中四角”各城市工业废水排放量空间异质性较大且呈空间分散状态; 当 $I = 0$ 时, 表明“中四角”各城市工业废水排放量呈随机状态^[2, 11]。

(2) 局部型 (Local Spatial Autocorrelation)。该指数可将全局型的 Moran's I 指数分解到各个组成单元, 结合 LISA (Local Indicators of Spatial Association) 方法测度以每个组成单元为中心的一小片区域的聚集或离散效应, 并识别局部空间集聚 (热点或冷点) 与离群点, 揭示其空间异质性, 计算公式^[12] 为:

$$I_i = Z_i \sum (W_{ij} Z_j) \quad (2)$$

$$Z_i = \frac{(x_i - \bar{x})}{\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}} \quad (3)$$

$$Z_j = \frac{(x_j - \bar{x})}{\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (x_j - \bar{x})^2}} \quad (4)$$

式中: I_i 为地区 i 的局部 Moran's I 指数; Z_i 和 Z_j 为经过标准差标准化的观测值, 其他字母所代表的含义与公式 (1) 相同。 I_i 为正则表示同样类型属性值的要素相邻近呈现高-高或低-低的空间集聚区; I_i 为负则表示不同类型属性值相邻近呈现高-低或低-高的空间集聚区; I_i 的绝对值越大, 其邻近程度越大。

3.1.2 重心迁移模型

(1) 几何重心测算。将研究区中的 35 个城市视为同级别区, 设第 i 个次区域的中心城市地理坐标为 (X_i, Y_i) , 每个城市都有其对应的多重属性 (W_i), 由力学可知, 该区域某种属性的重心的坐标^[13] 为:

$$X = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i W_i)}{\sum_{i=1}^n W_i} \quad (5)$$

$$Y = \frac{\sum_{i=1}^n (Y_i W_i)}{\sum_{i=1}^n W_i} \quad (6)$$

式中: X, Y 分别为第 n 年特定属性中心坐标的经度 (Longitude) 和纬度 (Latitude); X_i, Y_i 分别为第 i 个城市中心的经、纬度坐标; W_i 为第 i 个城市某的属性值。

(2) 偏移距离计算。重心位置确定后, 可从重心移动方向与移动距离来分析重心的迁移特征。重心偏离方向表示经济社会活动属性空间现象的“高密度”部位, 重心偏离距离表示经济社会活动属性空间的均衡程度^[14]。

① 移动方向: 重心移动方向以 2006 年为起点, 第 t 年重心坐标为 $(long_t, lat_t)$, 第 $t+1$ 年重心坐标为 $(long_{t+1}, lat_{t+1})$, 第 $t+1$ 年相对于第 t 年的重心偏移角度为 θ , 则计算公式^[13] 为:

$$\begin{aligned} \theta &= \theta_{(t+1)-t} \\ &= \frac{n\pi}{2} + \arctan[(lat_{t+1} - lat_t)/(long_{t+1} - long_t)] \end{aligned} \quad (7)$$

式中: $n = 0, 1, 2$ 。并将弧度转化为角度 θ , 则 $\theta \in (-180^\circ, 180^\circ)$ 且规定正东方向为 0° ; 逆时针为正, 即第一象限 ($0^\circ, 90^\circ$) (东北方向)、第二象限 ($90^\circ, 180^\circ$) (西北方向) 为正; 反之顺时针为负, 即第三象限 ($-180^\circ, -90^\circ$) (西南方向)、第四象限 ($-90^\circ, 0^\circ$) (东南方向) 为负。

② 移动距离: d 为第 $t+1$ 年相对于第 t 年重心移动的距离, 计算公式^[13] 为:

$$d = d_{(t+1)-t} = C \cdot \sqrt{(long_{t+1} - long_t)^2 + (lat_{t+1} - lat_t)^2} \quad (8)$$

式中: 常数 $C = 111.111$, 代表由地球表面坐标 (单位 0°) 转化为平面距离 (单位 km) 的系数^[15]。

3.2 数据来源

研究时段为 2006-2017 年, 研究单元为“中四角”35 个城市 (因仙桃市、潜江市、天门市、襄阳市和宜昌市 5 个城市数据资料难以获取, 故在本研究中未考虑)。工业废水排放量相关数据来源于 2006-2017 年的《中国城市统计年鉴》。基于前期研究^[16], 选取“中四角”地区生产总值、人均生产总值、工业生产总产值和总人口数等指标进行分析, 其中以 1999 年不变价 (1999 年值取为 100) 计算三次产业的生产总值, 并将其计算后的生产总值之和作为“中四角”35 个城市地区生产总值; 用国内生产总值除以人口数表示人均生产总值, 以当年价格计算出的生产总值表示工业生产总产值; 用常住人口表示总

人口数。以上相关数据均来自 2006 - 2017 年的《中国城市统计年鉴》,且通过查找各省、市的统计年鉴来补全《中国城市统计年鉴》中缺失的部分数据。

4 实证与分析

4.1 “中四角”工业废水排放量时序特征分析

图 2 为 2006 - 2017 年“中四角”工业废水排放量。由图 2 可知,2006 - 2017 年“中四角”工业废水排放总量逐年减少;其中 2006 - 2017 年湖北省工业废水排放总量呈小幅减少趋势,在 2012 年达排放高峰,随后持续减少;湖南省工业废水排放量一直呈减少趋势;江西省工业废水排放量呈增大 - 减少 - 增大 - 减少 - 增大 - 减少的不稳定变化趋势;安徽省工业废水排放总量呈先增大后减少的趋势,且是“中四角”工业废水排放总量最低的省份。从数量上看,2006 - 2017 年“中四角”工业废水年排放总量从 24.53×10^8 t 减至 15.13×10^8 t,减少 38.32%;其中湖北省工业废水排放总量从 6.12×10^8 t 减至 3.32×10^8 t,减少 45.75%;湖南省工业废水排放量从 9.80×10^8 t 减至 4.13×10^8 t,减少 57.86%;江西省工业废水排放量从 4.97×10^8 t 减至 4.84×10^8 t,减少 2.62%;安徽省工业废水排放总量从 3.63×10^8 t 减至 2.84×10^8 t,减少 21.76%。由此可见,“中四角”各省工业废水排放总量减少最大是湖南省,其次是湖北省,而江西省减少幅度最小。董玉竹^[17]研究也发现,由于目前对环境的监控政策力度不够,治理投入不足而致使江西省工业废水排放仍然处于增长的趋势。

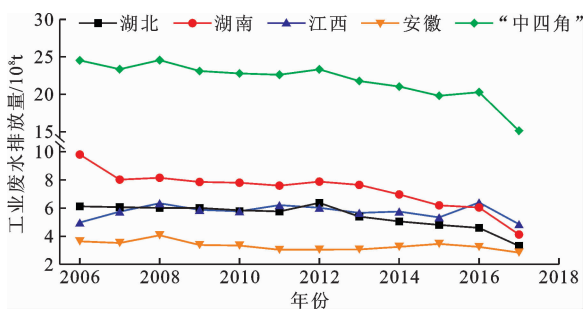


图 2 2006 - 2017 年“中四角”工业废水排放量

4.2 “中四角”工业废水排放量空间格局分析

4.2.1 空间格局演变分析 选取 2006、2010、2014 和 2017 年,运用 ArcGIS10.5 的空间统计模块将“中四角”各城市工业废水排放量按照自然断裂点从高到低划分为 5 类(图 3),单位为 10^8 t,分别为低排放 (0.06, 0.33]、较低排放 (0.34, 0.51]、中等排放 (0.52, 0.72]、较高排放 (0.73, 1.37]、高排放 (1.38, 2.70]。研究发现,“中四角”的多数城市工业废水排放量呈下降趋势,空间格局特征明显且呈

现西南从高到低而中东从低到高的演变特征(图 3)。2006 年,高排放类型有武汉、娄底和常德 3 个城市,其中武汉工业废水排放量高达 2.60×10^8 t,位居“中四角”之首;较高排放类型则分布在马鞍山、黄石、九江、南昌、岳阳、益阳、湘潭、株洲、衡阳和郴州等 10 个城市;合肥、六安、孝感、荆门、荆州、景德镇、鹰潭、新余和吉安等 9 个城市为中等排放类型;较低排放类型包括芜湖、铜陵、安庆、黄冈、上饶、抚州和长沙等 7 个城市;而低排放类型仅有池州、黄山、鄂州、咸宁、宜春和萍乡等 6 个城市。2010 年,“中四角”有超过 57% 的城市工业废水排放量在不同程度上呈下降趋势,其中最明显的是 2006 年为高排放类型的娄底和常德市降为较高排放类型,马鞍山、黄石、九江、益阳、株洲、衡阳、郴州等 7 个城市由较高排放降为中等排放,而吉安由中等排放升为较高排放,宜春由低排放升为较低排放。2014 年,“中四角”有 8 个城市(娄底、六安、荆门、吉安、鹰潭、黄石、益阳和湘潭)的工业废水排放量呈现了不同程度下降趋势,益阳和湘潭由较高排放降为中等排放,六安由中等排放降为低排放等;而荆州、景德镇、铜陵、安庆、上饶、宜春、九江、南昌、岳阳等 9 个城市的工业废水排放量出现不同程度上升,其中九江、南昌和岳阳由较高排放升为高排放,荆州由中等排放升为高排放等。2017 年,“中四角”工业废水排放量除上饶上升外,武汉、常德、娄底、黄石、抚州、益阳、湘潭、株洲、衡阳等 20 个城市出现不同程度下降。由此可见,2006 - 2017 年“中四角”工业废水排放量城际空间格局演变较为明显,特别在 2017 年间。这可能由于“十三五”期间,为响应加快城市群建设发展的国家要求,促使跨区域城市群间的基础设施、产业分工、环境保护及生态治理等联动合作,促进鄱阳湖、洞庭湖生态经济区和汉江、淮河生态经济带建设^[18]。而城市群的大中城市在加快产业转型升级,形成了资源环境可承载的区域协调发展新格局。

4.2.2 空间集聚特性分析 由表 1 可知,从全局 Moran's I 指数来看, P 值并未通过 5% 水平的显著性检验。2006 - 2017 年“中四角”35 个城市的工业废水排放量总体上不存在明显的空间集聚趋势,呈现空间随机分布的态势,说明工业废水排放邻近空间并不存在扩散效应。然而全局莫兰指数表示的是总体自相关统计量,则无法说明具体城市工业废水排放的空间集聚分布程度^[19-20],因此要确认“中四角”35 个城市工业废水排放量是否存在局部集聚现象,还需要结合局部 Moran's I 指数的 LISA 集聚图来识别。

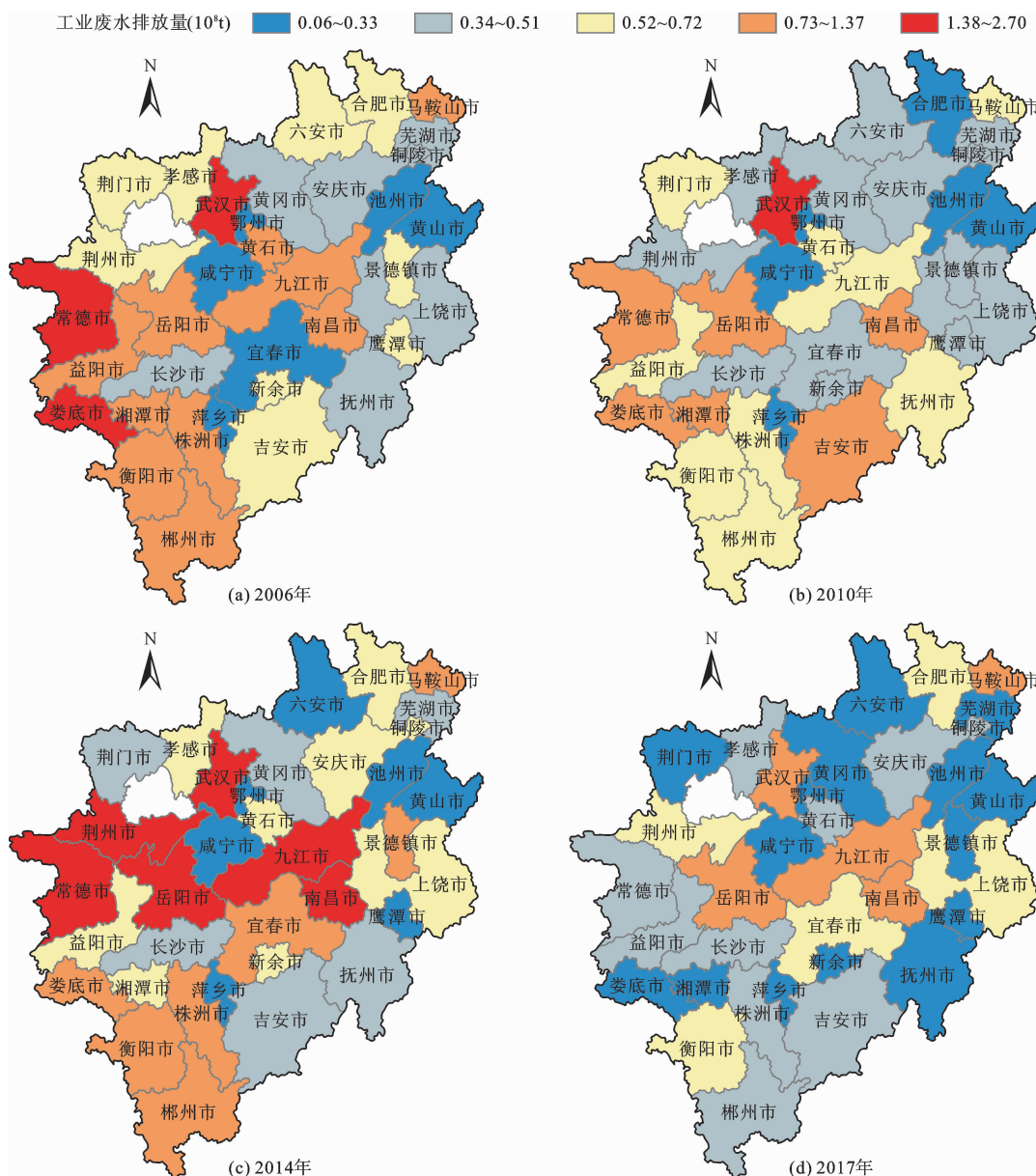


图3 “中四角”工业废水排放量的空间格局演变

表1 “中四角”工业废水排放的全局 Moran's I 指数

年份	Moran's I	$E(I)$	Sd	$P(I)$
2006	-0.002363	-0.029412	0.008821	0.773350
2007	-0.055599	-0.029412	0.008149	0.771750
2008	-0.100686	-0.029412	0.008864	0.449019
2009	-0.050405	-0.029412	0.008901	0.823909
2010	-0.088056	-0.029412	0.008531	0.525485
2011	-0.107291	-0.029412	0.008385	0.395050
2012	0.064642	-0.029412	0.008686	0.312905
2013	0.011021	-0.029412	0.009348	0.675809
2014	-0.043116	-0.029412	0.009332	0.887187
2015	-0.058766	-0.029412	0.009394	0.761988
2016	-0.001732	-0.029412	0.009663	0.902117
2017	-0.030573	-0.029412	0.009562	0.990524

结合 Moran 散点图和局部 Moran's I 指数, 得出 2006 - 2017 年“中四角”35 个城市的工业废水排放量 LISA 集聚图, 如图 4 所示。

图 4 明显地显示了“中四角”各城市工业废水排放量的集聚类型, 且每年的集聚单元均位于不同的区域。本研究在参考孙才志等^[20]的研究基础上将 35 个城市划分为 4 种类型, 分别为低低集聚区(LL)、低高集聚区(LH)、高低集聚区(HL)和高高集聚区(HH), 以更直观地反映“中四角”各城市工业废水排放量的空间关系特征, 这些集聚区虽在空间位置上基本保持不变, 但其空间范围随着时间的变化而改变^[19-20]。

(1) 低低集聚区(LL)。多数聚集在“中四角”

的东部地区,其中安庆、池州、黄山、景德镇几个城市在研究期间有较明显的集聚现象,形成了一个工业废水排放的低值区域。随着时间的推移,“中四角”35个城市工业废水排放的低低集聚区逐渐减少,说明各城市地理空间上的连续性在逐渐降低。

(2)低高集聚区(LH)。低高集聚现象较为显著,主要集中在以咸宁为中心的中部区域,表明该区域自身工业废水排放较低,而周边城市工业废水排放较高。2006-2014年间荆州由低高集聚转变为高高集聚,最后转为不显著的集聚趋势,而益阳则与之相反,由高高集聚转变为低高集聚;其他地区的工业废水排放量不存在显著的集聚特征。

(3)高低集聚区(HL)。2006-2014年间景德

镇由低低集聚转变为高高集聚,说明景德镇在2014年产生了自身工业废水排放较高,邻近城市排放较低的情况。景德镇在2014年工业废水排放达到 0.64×10^8 t,较上一年增长60%,而邻近区域池州和黄山的工业发展水平一直不高,故废水排放处于较低水平。

(4)高高集聚区(HH)。2006年高高集聚区主要集中在益阳和衡阳两个城市,说明这两个城市的工业废水排放量较高,同时这两个城市周边的城市工业废水排放量也较高^[11],在局部形成了明显空间集聚特征;而2014年,高高集聚的城市只有荆州市,说明在2006-2014年间工业废水的高排放呈现由南向北扩散现象。

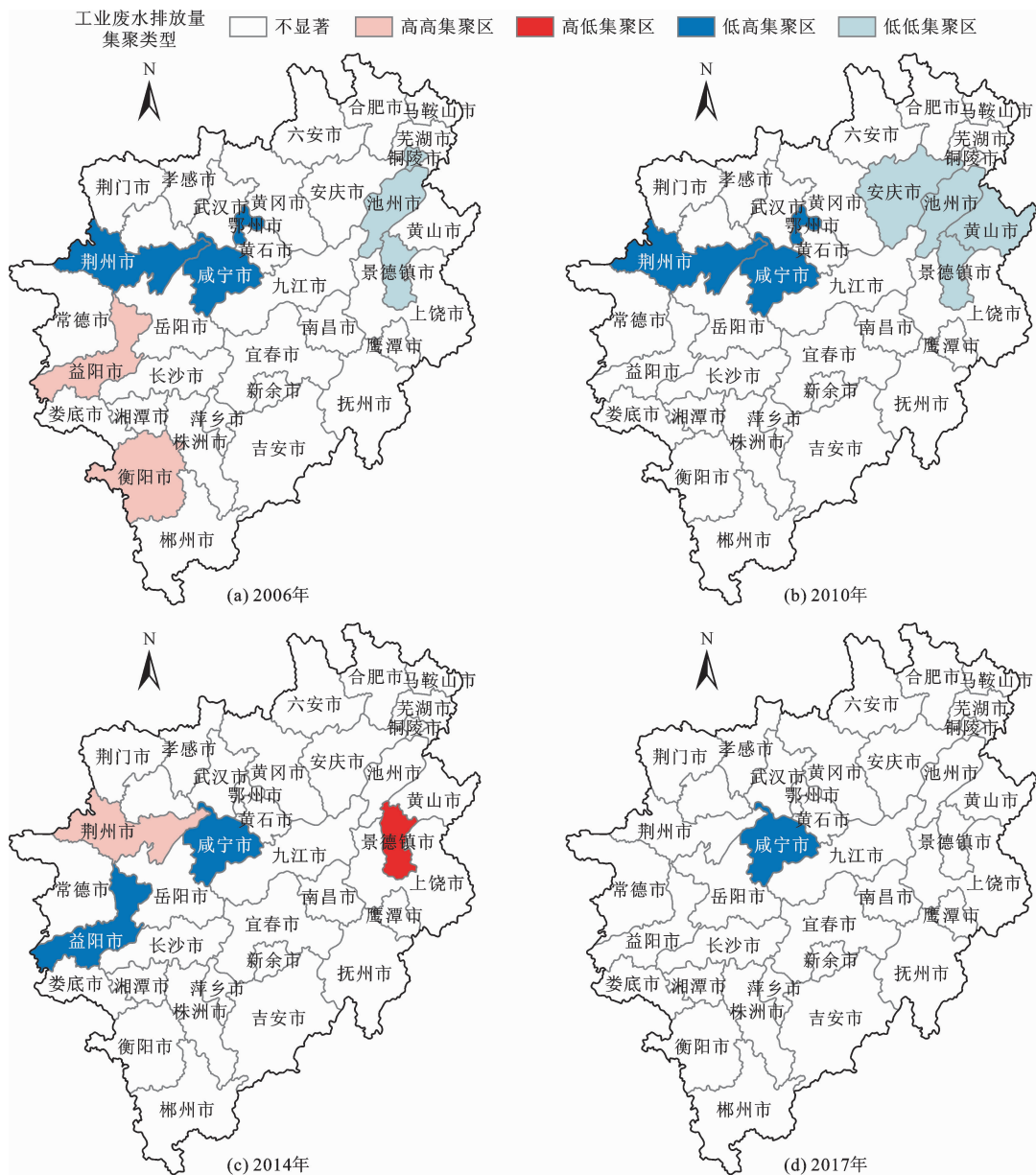


图 4 “中四角”工业废水排放量的 LISA 集聚图

2006-2017年“中四角”工业废水排放在局部空间集聚趋势发生明显变化,但只有高低集聚类型较为显著,说明总体上工业废水排放量在大幅减少,这也从侧面印证了工业废水排放空间格局演变的研究结论。

4.2.3 空间重心迁移轨迹分析 以“中四角”各城市为基本统计单元,取 X_i 、 Y_i 为各城市地理中心的经度和纬度, W_i 为各城市历年工业废水排放 (10^8 t) 和工业总产值,利用重心模型计算工业废水排放和工业总产值重心的空间移动方向和距离(表2),同时绘制出工业废水排放和工业总产值重心迁移轨迹图(图5)。2006-2017年间“中四角”工业废水排放重心主要在东经 $114.38^\circ\text{E} \sim 114.95^\circ\text{E}$, 北纬 $29.18^\circ\text{N} \sim 29.34^\circ\text{N}$ 区域内移动(图5),其中向东北平均移动5次,移动频率为50%,表明“中四角”该区域的工业废水排放比重在逐渐上升(表2)。具体从移动方向看,2000-2014年间工业废水排放重心向高经度、低纬度方向移动,2015-2017年间工业废水排放重心向高经度、高纬度方向移动(表2);从移动距离看,2006-2017年“中四角”工业废水排放重心向东北方向共移动了107.88 km,其中2007年重心向东南方向移动的距离最大,达22.63 km,表明“中四角”东南部工业废水排放加重;而2010年重心向东北方向移动的距离最小,为1.53 km,表明“十一五”期间“中四角”工业废水排放重心趋于稳

定,工业废水排放量已得到有效的控制。

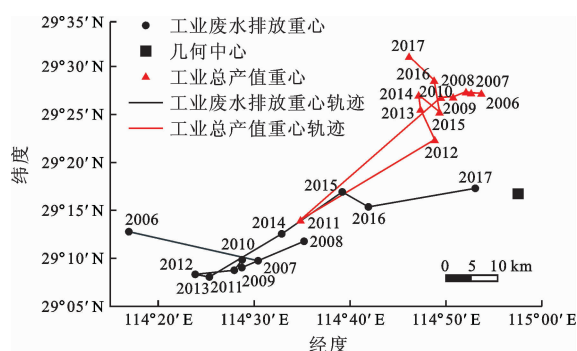


图5 “中四角”工业废水排放量与工业总产值重心迁移轨迹

由表2还可知,2006-2017年间“中四角”工业总产值重心总体向西北方向移动,移动总距离为94.39 km,其中2011年向西南方向移动了33.49 km,2012年向东北方向移动了27.47 km,其他年份重心移动轨迹变化较小。结合图5可知,2006-2017年间“中四角”工业总产值重心与工业废水排放重心均偏离几何中心($114.96^\circ\text{E}, 29.28^\circ\text{N}$),工业总产值重心基本位于几何中心的西北方并逐渐偏离,而工业废水排放重心基本位于几何中心的西南方并逐渐向几何中心(东方)靠拢且移动速度明显高于工业总产值重心偏移速度,这表明“中四角”工业废水排放重心和工业总产值重心迁移轨迹存在脱钩现象^[21],具体驱动机制还亟待下一步深入剖析。

表2 2006-2017年“中四角”工业废水排放和工业总产值重心移动方向和距离

年份	工业废水排放重心				工业总产值重心			
	经度/(°)	纬度/(°)	方向/(°)	距离/km	经度/(°)	纬度/(°)	方向/(°)	距离/km
2006	114.2825	29.2130			114.8949	29.4536		
2007	114.5070	29.1623	-12.7203	22.63	114.8772	29.4542	177.9959	1.72
2008	114.5870	29.1963	23.0350	8.68	114.8683	29.4565	165.4261	0.90
2009	114.4785	29.1506	-157.1571	11.76	114.8458	29.4472	-157.5346	2.42
2010	114.4796	29.1643	85.2814	1.53	114.8247	29.4466	-178.4753	2.06
2011	114.4659	29.1461	-126.8639	2.42	114.5809	29.2342	-138.9285	33.49
2012	114.3979	29.1388	-173.9312	6.70	114.8138	29.3732	30.8332	27.47
2013	114.4225	29.1342	-10.6342	2.46	114.7891	29.4261	115.0517	6.35
2014	114.5516	29.2114	30.8674	15.25	114.7859	29.4511	97.3094	2.80
2015	114.6531	29.2822	34.8953	12.65	114.8219	29.4217	-39.3077	4.79
2016	114.6984	29.2560	-29.9777	5.29	114.8129	29.4760	99.4079	6.10
2017	114.8847	29.2880	9.7396	18.51	114.7693	29.5180	136.0515	6.30

5 结论与建议

(1)2006-2017 年“中四角”工业废水排放总量逐年减少,其中减少最大是湖南省,其次是湖北省,而江西省减少幅度最小。

(2)2006-2017 年间“中四角”多数城市工业废水排放量的空间分异特征较为明显,总体呈现西南从高到低,而中东从低到高的演变特征。2006-2017 年总体上“中四角”工业废水排放量不存在明显的空间集聚趋势,空间自相关性不强;工业废水排放的 LL 集聚区主要集中在“中四角”的东部地区,如池州市、黄山市及景德镇市这些以旅游业为主要产业的地区,HH 集聚在 2006-2014 年期间,工业废水的高排放呈现由南向北的扩散趋势,而 2017 年只有 LH 集聚较为显著,主要在“中四角”的中部城市咸宁。

(3)2006-2017 年间“中四角”工业废水排放重心主要在东经 114.38°E~114.95°E,北纬 29.18°N~29.34°N 区域内移动,向东北平均移动 5 次,移动频率为 50%,总体移动距离为 107.88 km;其中 2007 年重心向东南方向移动的距离最大(达 22.63 km),而 2010 年重心向东北方向移动的距离最小(为 1.53 km);“中四角”工业总产值重心总体向西北方向移动,移动总距离为 94.39 km,其中 2011 年向西南方向移动了 33.49 km,2012 年向东北方向移动了 27.47 km,其他年份重心移动轨迹变化较小。2006-2017 年间“中四角”工业总产值重心基本位于几何中心的西北方并逐渐偏离,而工业废水排放重心基本位于几何中心的西南方并逐渐向几何中心(东方)靠拢且移动速度明显高于工业总产值重心偏移速度。

参考文献:

[1] CHEN K L, LIU X Q, DING L, et al. Spatial characteristics and driving factors of the provincial wastewater discharge in China [J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2016, 13 (12): 1221-1239.

[2] 陈昆仑,郭宇琪,刘小琼,等. 长江经济带工业废水排放的时空格局演化及驱动因素[J]. *地理科学*, 2017, 37 (11): 1668-1677.

[3] 石敏俊,杨晶,龙文,等. 中国制造业分布的地理变迁与驱动因素[J]. *地理研究*, 2013, 32(9): 1708-1720.

[4] HE C, WANG J. Regional and sectoral differences in the

spatial restructuring of Chinese manufacturing industries during the post-WTO period [J]. *Geo Journal*, 2012, 77 (3): 361-381.

- [5] 吴爱芝,孙铁山,李国平. 中国纺织服装产业的空间集聚与区域转移[J]. *地理学报*, 2013, 68(6): 775-790.
- [6] 毛琦梁,董锁成,王菲,等. 中国省区间制造业空间格局演变[J]. *地理学报*, 2013, 68(4): 435-448.
- [7] 石敏俊,郑丹,雷平,等. 中国工业水污染排放的空间格局及结构演变研究[J]. *中国人口·资源与环境*, 2017, 27(5): 1-7.
- [8] 李小玉,邱信丰. 长江中游城市群工业绿色发展协作机制研究[J]. *经济纵横*, 2017(10): 67-74.
- [9] 成金华,李悦,陈军. 中国生态文明发展水平的空间差异与趋同性[J]. *中国人口·资源与环境*, 2015, 25(5): 1-9.
- [10] 周侃. 中国环境污染的时空差异与集聚特征[J]. *地理科学*, 2016, 36(7): 989-997.
- [11] 庄汝龙,宓科娜,梁龙武. 中国工业废水排放格局及其驱动因素[J]. *长江流域资源与环境*, 2018, 27(8): 1765-1775.
- [12] 唐兵,安瓦尔·买买提明. 基于 ESDA 的新疆城市化空间格局研究[J]. *人文地理*, 2012, 27(5): 83-88.
- [13] 常钰卿,邵京坤. 基于 GIS 的山东省经济与工业污染重心空间演变[J]. *科技经济导刊*, 2019, 27(7): 88-91.
- [14] 丁焕峰,李佩仪. 中国区域污染重心与经济重心的演变对比分析[J]. *经济地理*, 2009, 29(10): 1629-1633.
- [15] 刘嘉,谢丽琴,方舟. 中国制造业重心时空变动轨迹分析——基于中国制造业 500 强企业[J]. *现代营销(下旬刊)*, 2014(6): 18-19.
- [16] 赵蕾,胡绵好. 江西省经济增长与工业“三废”排放关系及其驱动因素分析——基于 EKC 和 LMDI 模型[J]. *环境保护与循环经济*, 2019(2): 15-21.
- [17] 董玉竹. 江西省绿色发展的工业“三废”排放问题的研究[D]. 南昌:南昌大学, 2017.
- [18] 梁小青,李春侠,杨梅英. 汉江生态经济带协调发展路径研究[J]. *荆楚学刊*, 2018, 19(5): 29-38.
- [19] 孙才志,赵良仕. 环境规制下的中国水资源利用环境技术效率测度及空间关联特征分析[J]. *经济地理*, 2013, 33(2): 26-32.
- [20] 孙才志,陈栓,赵良仕. 基于 ESDA 的中国省际水足迹强度的空间关联格局分析[J]. *自然资源学报*, 2013, 28(4): 571-582.
- [21] 隋建利,刘碧莹,刘金全. 中国工业经济增长与工业污染的内在关联机制测度[J]. *资源科学*, 2018, 40(4): 862-873.