

中国工业废水排放空间分异影响机制研究*

李亚星¹ 吴升¹ 阎波杰^{2#}

(1.福州大学数字中国研究院(福建),福建 福州 350002;2.闽江学院海洋学院,福建 福州 350108)

摘要 基于2016年工业废水排放等统计数据,利用地理信息系统空间分析方法研究中国工业废水排放量空间格局,并利用地理探测器探究其影响机制。结果表明:(1)中国工业废水排放量存在较明显的空间内部分异现象,整体呈现“东部高高聚集,西北部低低聚集”的空间分布格局。(2)中国工业废水排放空间分异影响依次为生产要素投入水平、工业经济效益、城镇化率、资源消耗水平、工业化水平。影响因子交互过程中存在“弱+弱>强”和“1+1<2”的现象。(3)高工业发展省份及城市依旧处于粗放型经济发展模式,应当采取产业分散转移,在保证经济发展水平稳定的情况下适当降低资源消耗水平。在城镇化进程中,减少原材料消耗,通过严格的生态环境保护政策提高环保意识,最大程度降低污染。

关键词 工业废水 空间格局 地理探测器 空间分异

DOI:10.15985/j.cnki.1001-3865.2021.09.003

Influence mechanism of spatial differentiation of industrial wastewater discharge in China LI Yaxing¹, WU Sheng¹, YAN Bojie². (1. The Academy of Digital China, Fuzhou University, Fuzhou Fujian 350002; 2. Ocean College, Minjiang University, Fuzhou Fujian 350108)

Abstract: Based on the statistical data of industrial wastewater discharge in 2016, the spatial pattern of industrial wastewater discharge in China was studied by using the spatial analysis method of GIS, and the impact mechanism was explored by using geographic detectors. The result showed that: (1) the space distribution of industrial wastewater discharge had obvious spatial differentiation and demonstrated a spatial pattern of “high concentration in the east and low concentration in the northwest”. (2) The impacts of spatial differentiation of industrial wastewater discharge in China were the input level of production factors, industrial economic benefits, urbanization rate, resource consumption level and industrialization level. The interacting of influencing factors showed a phenomenon of “weak+weak>strong” and “1+1<2”. (3) Provinces and cities with high industrial development were still in an extensive economic development model, and industrial decentralized transfer should be adopted to appropriately reduce the level of resource consumption while ensuring the stability of economic development level. In the process of urbanization, raw material consumption should be reduced, with environmental awareness improved through strict environmental protection policies to minimize pollution.

Keywords: industrial wastewater; spatial pattern; geographical detector; spatial differentiation

2015年,中国工业废水排放量达199.5亿t,占废水排放总量的近1/3,由于工业废水往往包含大量有毒有害物质^[1],对生态环境和人类健康产生了较严重的危险^[2],因此工业废水排放引起的水体污染日益受到重视。掌握中国工业废水排放空间分布特征及影响工业废水排放的因素是节能减排、污染防治的基础。因此,开展工业废水排放的空间格局研究并探索其影响机制具有重要现实意义。

近年来,国内外学者主要研究内容包括两部分:(1)基于时间序列的工业废水污染时空特征。MA等^[3]利用空间自相关和环境库兹涅茨曲线研究了

2004—2015年中国省、地级市工业废水排放的时空变化特征。GENG等^[4]研究分析了1995—2010年中国31个省份工业废水排放变化的时空特征。陈昆仑等^[5]以长江经济带为例,通过探索性空间分析法开展了2002—2013年研究区工业废水排放的时空格局演化研究。这些均采用迪氏分解模型求解了工业废水排放的驱动因素。(2)多种方法相结合探索工业废水空间分布格局。郭政等^[6]利用地理集中度、标准差椭圆、空间形态差异指数等方法研究分析了长三角城市群工业废水时空演化特征,并利用迪氏分解模型分解了工业废水排放的驱动因素。庄

第一作者:李亚星,女,1995年生,硕士研究生,主要从事地理信息系统应用研究。*通讯作者。

*国家自然科学基金资助项目(No.41601601);福建省自然科学基金资助项目(No.2016J01713);福建省高等学校新世纪优秀人才支持计划项目(No.3230412301);福州市科技项目(No.2013-S-109)。

汝龙等^[7]利用地理信息系统空间分析和 SARAR 模型研究了省级尺度工业废水排放的时空格局、空间集聚特征和驱动因素。李茹枫等^[8]结合海南省环境统计数据与企业实地调研,经研究获得了海南省工业企业废水处理排放特征,并给出了优化设施运行相关参数、增加监测指标等建议。

综上所述,目前对工业废水排放空间分异的研究主要集中在空间分布特征及驱动因素。对工业废水空间分布驱动因素的研究仅停留在因子对工业废水空间分布的影响,缺乏对驱动因素间的相互作用过程及驱动因素对空间分异作用机制等的深度探究。局部空间自相关分析能很好揭示空间相关性,因此常被用来探究空间分布格局。地理探测器(GD)是近年来探索空间分异性驱动因子的热门研究方法^{[9]117},广泛应用于自然和社会科学等领域。王欢等^[10]综合多种影响因子,应用 GD 对喀斯特不同地形区域进行归因分析。王少剑等^[11]基于 GD 探究了全国县级单位的住宅价格差异影响机制。GD 不仅能以空间分布角度探索空间分异的影响机制,还能以定性、定量的方式深度探索因子之间的相互作用^{[9]124}。因此,本研究基于 2016 年全国工业废水排放量等统计数据,利用局部空间自相关分析研究全国工业废水排放量空间格局,并利用 GD 开展空间分异影响机制研究,结果可为工业废水污染防治、经济环境协调健康发展等研究提供科学借鉴。

1 数据与方法

1.1 数据获取与处理

从《中国环境年鉴》和《中国城市统计年鉴》获得 2016 年全国地级市 268 个城市的工业废水排放量、城市用地面积、城市道路面积、人均 GDP 等数据。利用 ArcGIS 10.2 软件和 Geoda 1.1 软件制作各种图件。

1.2 局部空间自相关分析

局部空间自相关可揭示观测单元与其相邻单元属性特征值之间的关联性或差异性。利用局部莫兰指数获得中国工业废水排放的 4 种空间分布关系:(1)高高聚集型(H-H),表示高值聚集;(2)低低聚集型(L-L),表示低值聚集;(3)高低聚集型(H-L),表示异常高值;(4)低高聚集型(L-H),表示异常低值^[12]。

1.3 GD

GD 是探测空间分异性并揭示其驱动力作用机制的统计方法,主要包括因子、交互、风险、生态 4 个探测器^[13]。因子探测器测度不同影响因子对工业

废水排放的解释力^{[9]117},值为 0~1,当值为 0 时,表示影响因子无法解释工业废水排放,当值为 1 时,表示影响因子可完全解释工业废水排放,数值越大解释力越强^{[9]118}。交互探测器识别工业废水排放影响因子间是独立还是交互作用,判断因子共同作用时是否会增强或减弱对工业废水排放的解释力^{[9]118}。风险探测器揭示影响因子在不同等级中的平均解释力^{[9]119}。生态探测器用于探测不同影响因子对工业废水排放控制力的相对影响程度是否存在显著差异^{[9]119}。

1.4 影响因子选取

利用 GD 研究影响因子对空间分异的作用机制,弱相关性因子对空间分异作用不大,而强相关性因子对空间分异作用机制更具探究意义^[14],因此本研究通过文献分析法^[15-16]得到现有研究中涉及工业污染的影响因子,通过 SPSS 20 软件进行相关性分析,筛选出 20 个相关系数大于 0.6 的强相关性因子(见表 1),分析强相关性因子对空间分异的作用机制。

表 1 影响因子及其代码
Table 1 Influence factor and its code

影响因子	代码	
城镇化率指标	城市用地面积	A1
	城市道路面积	A2
	建成区面积	A3
	居住地面积	A4
	排水管道长度	A5
	建成区绿化覆盖面积	A6
工业化水平指标	工业企业数	B
财政支出水平指标	科技支出	C1
	公共财政支出	C2
经济发展水平指标	人均 GDP	D
	产业结构指标	第一产业占 GDP 的比例
工业经济效益指标	工业总产值	F1
	工业企业利润总额	F2
资源消耗水平指标	全社会用电量	G1
	供水总量	G2
	居民生活用水量	G3
	工业用电	G4
生产要素投入水平指标	第二产业从业人员	H1
	第三产业从业人员	H2
外资利用水平指标	当年实际使用外资金额	I

2 结果与分析

2.1 中国工业废水排放空间分布特征

局部莫兰指数计算结果见表 2。中国工业废水排放量存在较明显的空间内部分异现象,整体呈现

表2 局部莫兰指数计算结果
Table 2 Result of Local Moran' I

聚集类型	城市
H-H	南通、苏州、泰州、无锡、徐州、东营、菏泽、临沂、上海、杭州、湖州、嘉兴、金华、绍兴
L-L	白银、定西、金昌、兰州、陇南、平凉、天水、武威、贵阳、齐齐哈尔、鹤岗、双鸭山、南阳、信阳、朝阳、抚顺、沈阳、通辽、赤峰、固原、中卫、宝鸡、汉中、咸阳、乐山、绵阳
L-H	蚌埠、淮北、宣城、酒泉、商丘、宿迁
H-L	重庆、嘉峪关、吉林

表3 因子探测结果
Table 3 Factors detection results

指标	A1	A2	A3	A4	A5	A6	B	C1	C2	D
<i>q</i>	0.186 3	0.350 4	0.349 8	0.238 2	0.237 3	0.269 8	0.345 8	0.267 0	0.259 0	0.166 9
<i>p</i>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
指标	E	F1	F2	G1	G2	G3	G4	H1	H2	I
<i>q</i>	0.141 1	0.307 9	0.359 7	0.304 1	0.279 7	0.243 6	0.350 4	0.518 0	0.212 9	0.216 0
<i>p</i>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

“东部高高聚集,西北部低低聚集”的空间分布格局。工业废水排放量高高聚集主要在江苏、浙江、山东的部分城市及上海,主要原因是工业结构以纺织业、制造业为主且工业水平较高;工业废水排放量低低聚集较分散地分布于西北、中部及东北地区,主要包括陕西、甘肃、宁夏、四川、河南、内蒙古、辽宁及黑龙江的部分城市,主要原因是工业废水源头产业不多且工业水平相对落后;工业废水排放量异常低值主要分布在高值边缘,甘肃酒泉,河南商丘,安徽淮北、蚌埠、宣城和江苏宿迁以农业、旅游业为主,因此工业废水排放与相邻城市差距很大,呈现异常低值聚集的空间布局;工业废水排放量异常高值较分散地分布在低低聚集城市间,嘉峪关、重庆和吉林属于重要的工业城市,以钢化、冶金等为主要产业,导致工业废水排放量呈现异常高值聚集。

2.2 中国工业废水排放影响机制分析

因子探测结果见表3,其中 q 为因子解释力,表示单个因子对工业废水排放的解释力,值越大解释力越高; p 为显著性检验,越接近于0效果越好。解释力最高的影响因子是H1,最低是E。中国工业废水排放空间分异排名前10位的影响因子依次为H1、F2、A2、G4、A3、B、F1、G1、G2、A6,对应指标为生产要素投入水平、工业经济效益、城镇化率、资源消耗水平、工业化水平。

工业废水排放量的20个影响因子中,因子的交互探测结果都是双因子增强作用,即一个因子与其他任意因子对工业废水排放的解释力都高于这个因子本身对工业废水排放的解释力。其中,A3与D双因子交互最强,其次为H1与C1(见表4)。另外,两因子相互作用强度比独立相加作用强度弱,说明在任意两个因子的控制下,工业废水排放具有聚集

特征的城市簇内部差异会减小。总之,影响因子交互过程中存在“弱+弱>强”和“1+1<2”的现象。

20个影响因子离散化为5个等级。由表5可见:总体上,除E外,等级越高,解释力越强,工业废水排放程度越强,高值主要分布在4、5等级,这些因子均为工业废水排放带来显著影响;E相反,等级越低,解释力越强,工业废水排放程度越强,高值主要分布在1、2等级。中国的第一产业是农业,结合局部莫兰指数聚类空间分布的低低聚集结果,可解释为以农业为支柱产业的城市工业废水排放量不高。

生态探测结果见表6,其中“Y”表示存在显著差异,且通过显著性水平0.05一致性检验;“N”表示不存在显著差异。大多数结果不存在显著性差异,与其他影响因子存在显著性差异较多的因子包括H1、E、D、F2、A2、A3、G4。综上,生产要素投入水平、产业结构、经济发展水平、工业经济效益、城镇化率、资源消耗水平比其他指标更具影响力,与因子探测结果相呼应,对工业废水排放有显著的控制作用。

2.3 影响因子原因分析

通过GD得到生产要素投入水平、产业结构、经济发展水平、工业经济效益、城镇化率、资源消耗水平对空间分异作用比其他指标更具影响力。江苏、浙江等省份的部分城市及上海纺织业、制造业十分发达,劳动力、资本投入高,即生产要素投入水平高,工业经济效益随之增高。以农业为主的产业结构的城市工业废水排放量普遍不高。胡志强等^[17]的研究结果表明,2013年C1仅对工业SO₂、工业粉尘具有明显依赖作用,但对工业废水排放作用不显著,而2016年H1(制造业)与C1对工业废水排放双因子交互最强,说明随着科学技术不断进步,科技研究过程中对制造业的支持加大了工业废水排放量。根据

表 4 交互探测结果
Table 4 Interactive detection results

代码	A1	A2	A3	A4	A5	A6	B	C1	C2	D
A1	0.186 3									
A2	0.438 2	0.350 4								
A3	0.484 9	0.564 3	0.349 8							
A4	0.301 4	0.425 7	0.459 4	0.238 2						
A5	0.287 8	0.433 7	0.528 4	0.362 5	0.237 3					
A6	0.323 4	0.418 5	0.387 7	0.319 8	0.346 7	0.269 8				
B	0.383 5	0.510 6	0.529 6	0.481 3	0.398 7	0.432 4	0.345 8			
C1	0.317 8	0.450 9	0.461 5	0.400 4	0.324 6	0.357 9	0.411 9	0.267 0		
C2	0.290 1	0.432 7	0.558 2	0.369 6	0.342 6	0.383 4	0.391 2	0.356 4	0.259 0	
D	0.398 1	0.439 7	0.670 3	0.440 7	0.386 4	0.485 7	0.401 9	0.346 0	0.379 7	0.166 9
E	0.244 3	0.449 0	0.475 7	0.285 6	0.307 2	0.319 7	0.379 6	0.319 7	0.335 6	0.207 2
F1	0.411 9	0.456 8	0.571 4	0.503 4	0.409 3	0.430 6	0.389 7	0.394 2	0.418 3	0.374 0
F2	0.473 3	0.426 8	0.526 3	0.473 6	0.499 9	0.457 6	0.470 4	0.472 2	0.480 1	0.499 7
G1	0.396 3	0.485 4	0.588 2	0.484 5	0.405 3	0.458 6	0.412 3	0.387 4	0.390 0	0.348 6
G2	0.353 6	0.410 6	0.542 6	0.314 4	0.450 0	0.352 5	0.504 4	0.450 2	0.422 5	0.494 8
G3	0.328 0	0.441 8	0.479 1	0.297 0	0.372 0	0.348 7	0.464 2	0.397 4	0.376 0	0.452 0
G4	0.470 5	0.452 4	0.553 6	0.473 5	0.446 5	0.464 4	0.520 0	0.489 2	0.480 7	0.413 7
H1	0.632 1	0.603 9	0.612 9	0.650 5	0.612 8	0.625 1	0.617 6	0.656 1	0.638 9	0.601 9
H2	0.365 3	0.413 4	0.449 6	0.320 2	0.395 0	0.381 8	0.476 1	0.468 7	0.375 1	0.477 9
I	0.261 7	0.432 8	0.422 3	0.348 9	0.323 4	0.329 7	0.386 4	0.327 3	0.296 8	0.326 4
代码	E	F1	F2	G1	G2	G3	G4	H1	H2	I
A1										
A2										
A3										
A5										
A6										
B										
C1										
C2										
D										
E	0.141 1									
F1	0.366 1	0.307 9								
F2	0.390 0	0.442 7	0.359 7							
G1	0.338 6	0.383 4	0.461 5	0.304 1						
G2	0.320 1	0.480 2	0.443 8	0.494 9	0.279 7					
G3	0.283 0	0.501 1	0.460 1	0.499 1	0.297 2	0.243 6				
G4	0.376 2	0.538 0	0.458 1	0.418 6	0.457 7	0.431 9	0.350 4			
H1	0.572 1	0.617 3	0.598 1	0.619 6	0.648 9	0.628 2	0.623 3	0.518 0		
H2	0.289 9	0.507 3	0.454 2	0.494 7	0.368 2	0.328 5	0.448 3	0.569 5	0.212 9	
I	0.273 6	0.410 8	0.473 5	0.374 5	0.393 5	0.373 0	0.454 6	0.593 5	0.370 0	0.216 0

表 5 风险探测结果
Table 5 Risk detection results

代码	1	2	3	4	5
A1	0.074 9	0.125 4	0.185 6	0.255 4	0.358 6
A2	0.060 6	0.120 9	0.196 0	0.177 4	0.445 1
A3	0.055 2	0.109 7	0.196 6	0.294 5	0.344 1
A4	0.061 8	0.106 7	0.202 1	0.231 1	0.398 3
A5	0.069 8	0.142 2	0.151 5	0.323 2	0.313 2
A6	0.063 8	0.108 4	0.182 1	0.319 0	0.326 8
B	0.076 2	0.150 4	0.246 7	0.500 0	0.026 7
C1	0.067 6	0.156 0	0.242 4	0.370 5	0.163 5
C2	0.063 8	0.101 6	0.187 0	0.352 7	0.295 0
D	0.091 7	0.101 4	0.177 6	0.285 9	0.343 4
E	0.407 1	0.230 1	0.129 8	0.163 1	0.069 9
F1	0.049 9	0.105 7	0.188 6	0.331 1	0.324 6
F2	0.057 2	0.100 6	0.160 7	0.249 4	0.432 1
G1	0.065 5	0.098 1	0.188 1	0.232 0	0.416 3
G2	0.065 1	0.107 2	0.175 7	0.286 5	0.365 4
G3	0.063 8	0.116 8	0.199 9	0.258 5	0.361 1
G4	0.054 0	0.088 5	0.161 4	0.299 9	0.396 1
H1	0.204 9	0.087 8	0.168 2	0.114 3	0.185 5
H2	0.061 9	0.111 4	0.187 7	0.214 0	0.424 9
I	0.067 9	0.127 5	0.264 6	0.223 7	0.316 4

表6 生态探测结果
Table 6 Ecological detection results

代码	A1	A2	A3	A4	A5	A6	B	C1	C2	D	E	F1	F2	G1	G2	G3	G4	H1	H2
A2	Y																		
A3	Y	N																	
A4	N	Y	Y																
A5	N	Y	Y	N															
A6	N	N	N	N	N														
B	Y	N	N	N	N	N													
C1	N	N	N	N	N	N	N												
C2	N	N	N	N	N	N	N	N											
D	N	Y	Y	N	N	N	Y	N	N										
E	N	Y	Y	N	N	Y	Y	Y	N	N									
F1	Y	N	N	N	N	N	N	N	N	Y	Y								
F2	Y	N	N	Y	Y	N	N	N	N	Y	Y	N							
G1	N	N	N	N	N	N	N	N	N	Y	Y	N	N						
G2	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	Y	N	N	N					
G3	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	Y	N	N					
G4	Y	N	N	Y	Y	N	N	N	N	Y	Y	N	N	N	N				
H1	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y				
H2	N	Y	Y	N	N	N	Y	N	N	N	N	N	Y	N	N	N	Y	Y	
I	N	Y	Y	N	N	N	Y	N	N	N	N	N	Y	N	N	N	Y	Y	N

《社会体制蓝皮书：中国社会体制改革报告 No.5 (2017)》指出,2016年江苏、广东、北京、天津的城镇化率分别达67.72%、69.20%、86.5%、82.93%。如此之高的城镇化进程中,大量消耗了原材料资源。北京、山东一直以来都处于高资源消耗水平,说明中国目前工业发展模式依旧处于粗放型增长方式。

3 结 语

(1) 中国工业废水排放量存在较明显的空间内部分异现象,整体呈现“东部高高聚集,西北部低低聚集”的空间分布格局。沿海城市工业废水排放高且密集,在高高聚集和低低聚集中出现异常值,工业废水排放量的空间分布现象主要由产业主导。

(2) 中国工业废水排放空间分异影响依次为生产要素投入水平、工业经济效益、城镇化率、资源消耗水平、工业化水平。影响因子交互过程中存在“弱+弱>强”和“1+1<2”的现象。随着科学技术不断进步,科技研究过程中对制造业的支持加大了工业废水排放量。另外,在任意两个因子的控制下,工业废水排放具有聚集特征的城市簇内部差异会减小。

(3) 中国工业发展主要为“高投入、高消耗、高污染”模式,高工业发展省份及城市依旧处于粗放型经济发展模式。如何转变经济发展模式,应当采取产业分散转移,在保证经济发展水平稳定的情况下适当降低资源消耗水平,加大对污染处理仪器的投资。在城镇化进程中,减少原材料消耗,通过严格的生态环境保护政策提高环保意识,最大程度降低污染。

参考文献:

- [1] GRUNG M, LICHTENTHALER R, AHEL M, et al. Effects-directed analysis of organic toxicants in wastewater effluent from Zagreb, Croatia[J]. *Chemosphere*, 2007, 67(1): 108-120.
- [2] 李伟舵, 陈传龙, 高超. 中国工业废水排放量地区间差异的影响因素研究[J]. *湖南理工学院学报(自然科学版)*, 2019, 32(4): 59-65.
- [3] MA B, TIAN G, KONG L. Spatial-temporal characteristics of China's industrial wastewater discharge at different scales[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2020, 27(8): 8103-8118.
- [4] GENG Y, WANG M L, SARKIS J, et al. Spatial-temporal patterns and driving factors for industrial wastewater emission in China[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2014, 76: 116-124.
- [5] 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.
- [6] 郭政, 陈爽, 董平, 等. 长江三角洲城市群工业污染时空演化及其驱动因素[J]. *中国环境科学*, 2019, 39(3): 429-441.
- [7] 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.
- [8] 李茹枫, 冯成洪, 张静, 等. 海南省工业企业废水处理排放特征研究[J]. *环境污染与防治*, 2017, 39(12): 1294-1298.
- [9] 王劲峰, 徐成东. 地理探测器: 原理与展望[J]. *地理学报*, 2017, 72(1).
- [10] 王欢, 高江波, 侯文娟. 基于地理探测器的喀斯特不同地貌形态类型区土壤侵蚀定量归因[J]. *地理学报*, 2018, 73(9): 66-78.
- [11] 王少剑, 王洋, 简雪芹, 等. 中国县域住宅价格的空间差异特征与影响机制[J]. *地理学报*, 2016, 71(8): 1329-1342.
- [12] CHENG S Q, WANG Z Y, YE X Y, et al. Spatiotemporal dynamics of carbon intensity from energy consumption in China[J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2014, 24(4): 631-650.
- [13] WANG J F, HU Y. Environmental health risk detection with GeogDetector[J]. *Environmental Modelling & Software*, 2012, 33: 114-115.
- [14] 王录仓, 武荣伟, 李巍. 中国城市群人口老龄化时空格局[J]. *地理学报*, 2017, 72(6): 1001-1016.
- [15] 耿强, 杨蔚. 中国工业污染的区域差异及其影响因素——基于省级面板数据的GMM实证分析[J]. *中国地质大学学报(社会科学版)*, 2010, 10(5): 12-16.
- [16] 田光辉. 中国工业污染的区域差异及其影响因素研究[D]. 开封: 河南大学, 2015.
- [17] 胡志强, 苗健铭, 苗长虹. 中国地市尺度工业污染的集聚特征与影响因素[J]. *地理研究*, 2016, 35(8): 1470-1482.