

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. [Chen Kunlun, Guo Yuqi, Liu Xiaoqiong et al. Spatial-temporal Pattern and Driving Factors of Industrial Wastewater Discharge in the Yangtze River Economic Zone. Scientia Geographica Sinica, 2017, 37(11): 1668-1677.] doi: 10.13249/j.cnki.sgs.2017.11.008

长江经济带工业废水排放的时空格局 演化及驱动因素

陈昆仑^{1,2}, 郭宇琪¹, 刘小琼¹, 张祚³

(1. 湖北大学资源环境学院, 湖北 武汉 430062; 2. 区域开发与环境响应湖北省重点实验室,
湖北 武汉 430062; 3. 华中师范大学公共管理学院, 湖北 武汉 430079)

摘要: 利用探索性空间分析方法(ESDA)和迪氏分解模型(LMDI)研究长江经济带2002~2013年工业废水排放的时空格局演化和主要驱动因素。① 时空格局演化方面, 时间上工业废水排放先上升后下降, 在2005年达到峰值。空间上, 排放量自上游向下游增加; 高排放城市减少, 中排放城市增多; 工业废水排放自下游向中上游转移, 并由大城市向中小城市扩散; 呈现明显的空间集聚状态。② 驱动因素方面, 经济发展效应和技术进步效应分别是工业废水排放增多和降低的主导因素; 产业结构效应的影响取决于产业发展政策的调整; 人口规模效应影响较小。

关键词: 长江经济带; 工业废水; 时空格局; LMDI

中图分类号: F419.9 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-0690(2017)11-1668-10

改革开放以来, 快速工业化和城市化推动了中国在经济高速增长和社会持续繁荣, 也造成了对资源和环境的大量消耗, 与此同时, 全球变化背景下的资源环境问题成为世界各国共同面临的问题, 如何正确处理经济发展与生态环境之间的关系, 也已成为学界和国际政治关注的焦点^[1]。目前中国的环境问题, 尤其是水环境问题十分严峻^[2]。据环保部门数据显示, 2001~2013年间中国十大水系和七大重点流域的干流水质总体上虽有所好转, 但部分断面却在持续恶化, 部分支流污染问题严重, 北方地区尤为突出^[3]。水环境质量问题的主要根源是社会经济发展过程中的污染物排放, 目前水环境污染排放的主要来源为工业废水和生活废水^[4]。其中工业废水因具有排放量大且集中的特征, 在水资源严重匮乏和水污染日益加剧的现实之下, 已成为节能减排和水环境治理的重点管控对象。

工业废水排放量是指经过企业厂区所有排放口排到企业外部的工业废水量, 包括生产废水、外排的直接冷却水、超标排放的矿井地下水和与工业废水混排的厂区生活污水^[5]。当前, 地理学角度的工业废水国内外研究主要集中于工业废水排放的时空特征和影响因素。研究尺度方面, 相关研究多关注全国或省级尺度, 缺乏对经济区的研究。时空特征上, 以工业废水及其污染物排放的时空规律分析为主, 研究认为中国辽河流域、东北三省以及全国范围均存在着排放量先升后降的变化趋势, 同时排放量和污染成分存在着明显的区域差异^[6-8], 但已有研究对空间格局的探讨多为简单的数据陈列和描述, 缺乏深入的空间分析。工业废水排放影响因素的研究方面, 常用的研究方法有投入产出模型、环境库兹涅茨曲线(EKC)以及迪氏因素分解法(LMDI)等。投入产出模型通常通过工业废水排放直接消耗系数的比较来确定

收稿日期: 2016-11-14; **修订日期:** 2017-03-10

基金项目: 国家自然科学基金项目(41401181, 41641007, 71774066)、区域开发与环境响应湖北省重点实验室开放基金[2017(C)002]资助。[Foundation: National Natural Sciences Foundation of China (41401181, 41641007, 71774066), Regional Development and Environmental Response Key Laboratory of Hubei Province [2017(C)002].]

作者简介: 陈昆仑(1982-), 男, 湖北荆门人, 博士, 副教授, 主要研究方向为城市地理与城市规划、城市环境与城市发展。E-mail: ckl_2001@163.com

其影响因素^[9-11];环境库兹涅茨曲线则着重研究经济增长与工业废水排放间的关系,目前中国的工业废水排放一般情况下随经济增长呈现倒“U”型曲线^[12-14];LMDI在将影响因素分解为技术效应、规模效应、结构效应等不同方面的基础上,计算它们对工业废水排放的贡献程度及结构关系^[15-17]。

改革开放以来,中国经济一直采取非均衡发展战略,从经济特区建设到沿海沿边开发战略,再到西部大开发和中部崛起战略,属于横向分层的梯级空间开发模式。这一系列发展战略极大推动经济发展和社会进步的同时,也在一定程度上影响了政策和资源的配置协调和公平问题,使得地区发展不平衡,区域间联系不紧密。长江流域无论从空间区位还是资源环境来看,都属于中国社会经济持续发展和区域均衡增长的重要承启和支撑地带,是实现发达地区与欠发达地区、重点开发地区与生态环境保育地区有序联结的关键区域^[18]。2014年“长江经济带战略”正式上升为国家战略,与“丝绸之路经济带战略”共同组成协调内部均衡与重构全球格局的宏图伟略,一定程度上也标志着横向分层的梯级空间开发模式向纵深融合的区域综合开发模式转变,不仅追求区域协同发展,更强调资源环境的承载与支撑。当前,长江经济带的发展战略由“大开发”转变为“大保护”,长江水资源保护和水污染治理将是未来长江经济带建设发展的重点之一。

因此,本研究选择长江经济带的工业废水排放为研究对象,结合探索性空间分析方法(ESDA)和迪氏分解模型(LMDI),从空间分析和因素分解两方面,分析2002~2013年长江经济带工业废水排放的时空格局演化及驱动因素。以期较为全面深入地理解长江经济带工业废水排放的时空特征,对未来工业废水的减排工作背景形成基本认识。从而为确定减排控制总量和制定差异化的区域减排策略提供参考,以更好地促进长江经济带经济和生态环境协调发展以及中国经济转型升级新支撑带目标的实现。

1 研究说明

1.1 研究区

长江经济带跨越中国东中西部,是以长江为纽带的经济地理范围,包括上海、浙江、安徽、江西、湖北、湖南、重庆、四川、云南、贵州11省市,面

积约205万 km²,人口及经济总量均超过全国总量的40%^[19]。长江拥有独特的生态系统,是中国重要的生态宝库,长江作为水源地,沿线化工产量约占全国的46%,并担负着重要的化工物流任务,生产和运输的危化品种类超过250种,长江水质受工业污染严重^[20]。目前,长江经济带的发展思路已发生明显变化,从强调“黄金水道”“立体交通走廊”建设,到追求“绿色发展”,要求在未来相当长的一段时间内把修复长江生态环境摆在压倒性位置。因此,协调经济发展与生态环境之间的关系,成为长江经济带发展过程中所必须关注的问题。

1.2 数据来源

本研究所需长江经济带各城市工业废水排放量数据来自2003~2014年《中国环境统计年鉴》^[21],考虑到各种因素对工业废水排放的影响,将工业增加值、各城市地区生产总值、人均GDP及年末总人口作为参考指标,数据来源于2003~2014年《中国统计年鉴》^[22]和《中国城市统计年鉴》^[23]。基于数据的可获取性考虑,本研究共涉及长江经济带116个地级统计单元。

1.3 研究方法

1) 探索性空间分析(ESDA)方法。本文运用探索性空间分析方法^[24]来描述工业废水排放的空间上的集聚水平。

(1) 全局空间自相关。计算Moran's I指数反映变量的空间集聚和关联程度^[25],公式为:

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

式中, I 为全局Moran's I指数; n 为研究区内城市总数; x_i 和 x_j 为城市 i 和 j 的工业废水排放量; \bar{x} 是某一年份不同城市工业废水排放量的平均值。 W_{ij} 为空间权重矩阵,通过基于邻接关系的最近邻分类算法获得。 I 的取值在 $[-1,1]$ 范围内,若 $I < 0$,表明城市工业废水排放呈空间负相关,即研究对象存在较大的空间异质性;若 $I > 0$,则表明城市工业废水排放呈空间正相关,不同城市的工业废水排放之间存在一定的空间关联影响,且越趋近于1,空间相关性越显著;若 $I = 0$,则说明城市工业废水排放呈随机分布态势^[26,27]。

(2) 局部空间自相关。全局空间自相关反映了工业废水排放在整个长江经济带的空间差异,但并未表现出城市局部空间分布状况的变化,需

要利用 Moran 散点图描述变量与其滞后向量的相关关系,反映空间单元观察值之间的关联和差异程度,其结果由 4 个象限表示某城市工业废水排放与其邻域城市工业废水排放的 4 种关系,即高高(HH)型、高低(HL)型、低高(LH)型、低低(LL)型^[28]。

2) LMDI 分解模型构建。20 世纪 80 年代,经济学家提出分解法(IDA),将研究对象分解成若干个子项,分析各子项对研究对象的影响程度。Ang 等人^[29,30]在分解法基础,提出一种因素分解模型,即 LMDI(迪氏分解法)分解法,目前在国际上广泛应用于环境和能源经济^[31,32]领域。

本研究运用 LMDI 分解模型对影响工业废水排放因素进行分解,研究技术改善效应、产业结构效应、经济发展效应以及人口规模效应对工业废水排放的贡献程度。根据 Kaya 恒等式进行分解:

$$W^t = \sum_i^n W_i^t = \sum_i^n \frac{W_i}{V_i} \cdot \frac{V_i}{G_i} \cdot \frac{G_i}{P_i} \cdot P_i \quad (2)$$

$$= \sum_i^n W_{tec,i} \cdot W_{str,i} \cdot W_{eco,i} \cdot W_{pop,i}$$

式中, W^t 代表第 t 年工业废水排放总量; W_i^t 代表 i 城市第 t 年的工业废水排放总量; W_i 代表 i 城市的工业废水排放量; V_i 为 i 城市的工业增加值; G_i 代表 i 城市的地区生产总值(GDP); P_i 为 i 城市的总人口; n 表示所研究的城市总数; $W_{tec,i}$ 为 i 城市的技术改善效应,用工业废水排放量与工业增加值的比值,即单位工业消耗的废水排放量表示。这一指标越低,说明资源的利用效率越高; $W_{str,i}$ 为 i 城市产业结构效应,用工业增加值占地区生产总值比重表示,这一指标用于反映地区经济发展对工业的依赖程度,体现工业结构变化对工业废水排放量的影响。工业在经济结构中所占比重越大,对工业废水排放的影响越显著; $W_{eco,i}$ 为 i 城市的经济发展效应,用人均社会生产总值表示,即地区生产总值与人口的比值,表现出经济发展水平对废水排放产生的影响; $W_{pop,i}$ 为 i 城市的人口规模效应,用城市总人口数表示。

基于 LMDI-I 型的总量贡献分解公式,获得各因素对废水排放强度的贡献度公式如下:

$$\Delta W_{tec,i} = \frac{W_i^t - W_i^0}{\ln W_i^t - \ln W_i^0} \cdot \ln \left(\frac{W_{tec,i}^t}{W_{tec,i}^0} \right) \quad (3)$$

$$\Delta W_{str,i} = \frac{W_i^t - W_i^0}{\ln W_i^t - \ln W_i^0} \cdot \ln \left(\frac{W_{str,i}^t}{W_{str,i}^0} \right) \quad (4)$$

$$\Delta W_{eco,i} = \frac{W_i^t - W_i^0}{\ln W_i^t - \ln W_i^0} \cdot \ln \left(\frac{W_{eco,i}^t}{W_{eco,i}^0} \right) \quad (5)$$

$$\Delta W_{pop,i} = \frac{W_i^t - W_i^0}{\ln W_i^t - \ln W_i^0} \cdot \ln \left(\frac{W_{pop,i}^t}{W_{pop,i}^0} \right) \quad (6)$$

式中, W_i^0 为基期年 i 城市的工业废水排放量; $\Delta W_{tec,i}$ 为 i 城市技术改善效应对工业废水排放的贡献程度; $\Delta W_{str,i}$ 为 i 城市产业结构效应对工业废水排放的贡献程度; $\Delta W_{eco,i}$ 为 i 城市经济发展效应对工业废水排放的贡献程度; $\Delta W_{pop,i}$ 为 i 城市人口规模效应对工业废水排放的贡献程度。其中,正值表示该项指标的增加对工业废水排放有增加作用,负值则代表该指标减少可抑制工业废水排放。

2 长江经济带工业废水排放的时空格局演化

2.1 时间演化

由长江经济带工业废水排放和人均 GDP 变化图(图 1),可以看出,2002~2013 年长江经济带人均 GDP 一直平稳增长,工业废水排放则呈现出先上升后下降的趋势,其中 2005 年为峰值,工业废水排放曲线与环境库兹列茨曲线相似,呈现出倒“U”型。

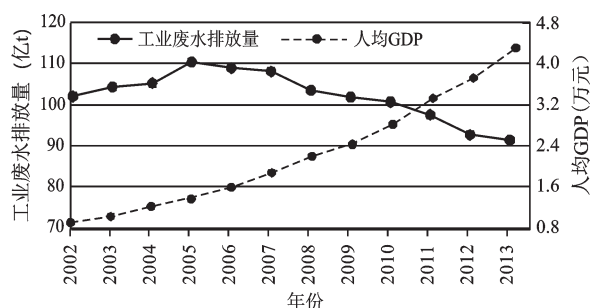


图 1 2002~2013 年长江经济带工业废水排放量和人均 GDP 变化

Fig. 1 Industrial wastewater discharge and per capita GDP in the Yangtze River Economic Zone from 2002 to 2013

长江经济带 2002~2013 年工业废水排放变化可分为 3 个阶段:2002~2005 年,长江经济带工业废水排放整体增长,尤其 2004~2005 年增长率最大,为 4.9%;2005~2009 年,工业废水排放开始减少,平均下降率为 2.0%;2009~2013 年减少速度逐渐加快,平均下降率为 2.6%。20 世纪初,国家在上一轮世界经济危机的冲击后采取积极的财政政策,在此基础上,长江经济带高速发展,GDP 年增长率一度高于全国平均水平,但这种发展对资金和资源的消耗量较大,是一种以牺牲部分生态环境为

代价的粗放型增长,且由于长江流域丰富的水资源和环境容量,多发展重化工业,在推动社会经济加速发展的同时,工业废水排放也随之增长^[33]。而自2006年始,“十一五”规划的出台要求建设资源节约型、环境友好型社会,在资源开采、生产消耗、废物产生、消费等环节,逐步建立全社会的资源循环利用体系,要求工业废水经处理后排放或循环利用,并于同年颁布《取水许可和水资源费征收管理条例》加强对水资源的管理和保护,并监督退水地点和退水中所含的主要污染物及污水处理设施。2012年,《国务院关于实行最严格水资源管理制度的意见》(国发[2012]3号)进一步促进了长江经济带各城市对水资源利用效率的重视,因此2005年后工业废水排放整体呈下降趋势。

2.2 空间分布变化

为进一步探讨各地区工业废水排放的空间变化关系,利用ArcGIS10.2将2002~2013年长江经济带116个城市的工业废水排放量按照自然断裂点划分为从高到低的5个等级(低排放0~0.6亿t、中低排放0.6~1.5亿t、中排放1.5~3亿t、中高排放3~5亿t、高排放5~9亿t)。基于节能减排目标提出的

时间和中国社会经济发展规划时间划分的考虑,选择2002、2005、2009和2013年4个分析断面绘制工业废水排放的总体空间分布图(图2)。

总体来看,长江经济带工业废水排在空间上呈现自上游向下游逐渐增加的趋势,下游的长三角区域是明显的高排放中心,上游的云贵地区则表现为明显的低排放状态,中游区域介于二者之间,呈现出分化格局。在时间上,长江经济带工业废水排放呈现先增加后减少的趋势,其中2005年是分界点。从排放格局来看,高排放城市持续减少,而中排放城市增多。2002~2005年,高排放量城市基本不变,中排放量城市开始增多,故工业废水排放量明显增加。到2009年,成都、武汉、上海、无锡等城市的工业废水高排放转变为中高或中排放。至2013年,一直处于高排放的重庆和杭州降为中高排放,吉安、乐山、宜宾、泸州等城市也由中低排放转变为低排放,长江经济带工业废水排放整体上逐渐减少。从变化趋势上看,工业废水排放呈现出自下游向中上游转移和从大城市向中小城市扩散的趋势。由图2可以看出,2002~2013年中上游城市工业废水排放增多,而下游地

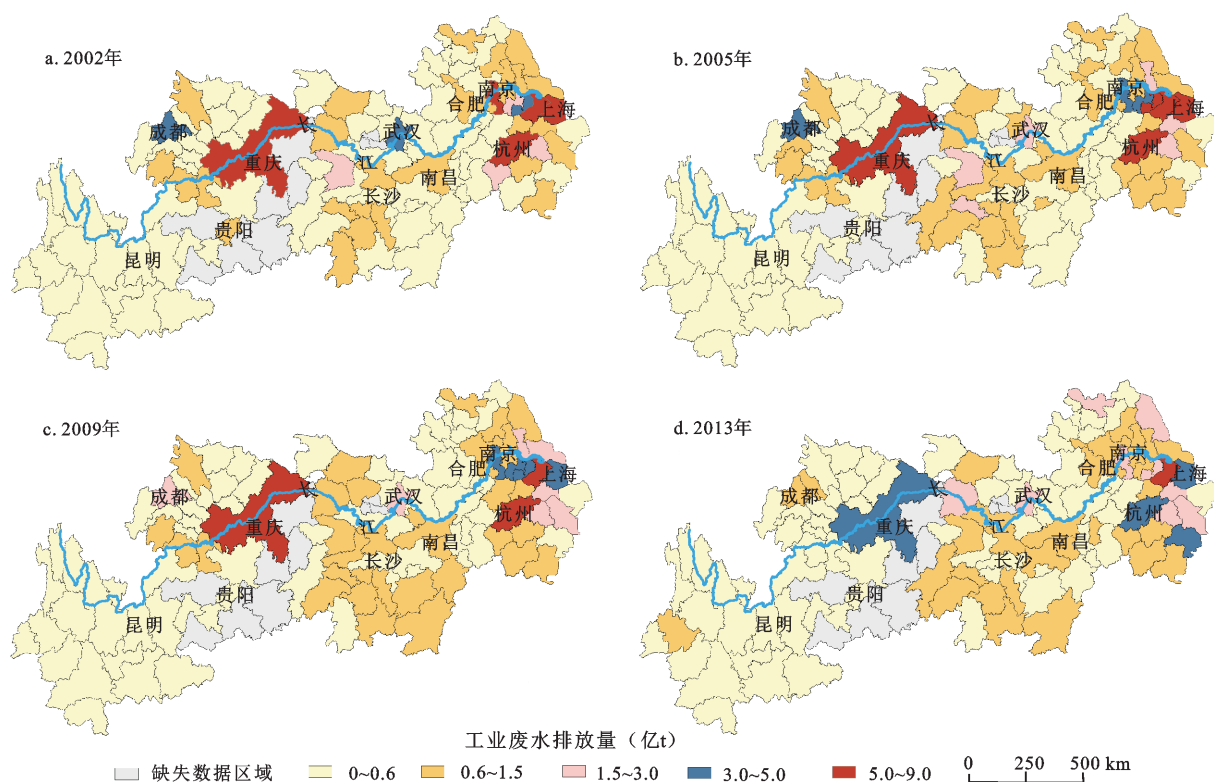


图2 长江经济带工业废水排放量的空间分布差异

Fig.2 Spatial distribution difference of industrial wastewater discharge in the Yangtze River Economic Zone

区工业废水排放日益减少,长江经济带工业废水排放呈现出自下游逐步向中上游转移的趋势;重庆、武汉、上海等大城市工业废水排放减少,与此同时,其周边中小城市的工业废水排放逐渐增多,工业废水排放从大城市向中小城市扩散。

2.3 空间关系变化

通过2002~2013年长江经济带工业废水排放全局Moran's I 指数的计算,测度其全局空间关系(表1),其中 $E(I)$ 为数学期望值, Sd 为标准差, $P(I)$ 为显著性水平。

表1 长江经济带工业废水排放的全局Moran's I 指数

Table 1 The Global Moran's I test of industrial wastewater discharge in the Yangtze River Economic Zone

年份	Moran's I	$E(I)$	Sd	$P(I)$
2002	0.137	-0.008696	0.003271	0.010614
2003	0.138	-0.008696	0.003257	0.009964
2004	0.156	-0.008696	0.003272	0.003960
2005	0.167	-0.008696	0.003218	0.001944
2006	0.205	-0.008696	0.003217	0.000168
2007	0.251	-0.008696	0.003267	0.000006
2008	0.233	-0.008696	0.003260	0.000023
2009	0.250	-0.008696	0.003224	0.000005
2010	0.309	-0.008696	0.003170	0.000000
2011	0.384	-0.008696	0.003197	0.000000
2012	0.368	-0.008696	0.003164	0.000000
2013	0.356	-0.008696	0.003218	0.000000

从Moran's I 指数的整体变化上看,指数始终在[0.137,0.384]间变化,并通过5%水平的显著性检验,呈现出正相关并趋于集聚,表明在研究期内,长江经济带工业废水排放量呈现显著的空间集聚状态。2002~2013年,Moran's I 指数由2002年的0.137上升至2011年的峰值0.384,说明在此期间长江经济带工业废水排放量的空间集聚日益增强;2011~2013年Moran's I 指数虽有所减少,但变化值小于0.020,空间集聚状态较稳定。

运用GeoDa软件创建空间权重矩阵,测算研究期内工业废水排放的空间集聚状况,绘制集聚类型空间分布图以及2002、2005、2009和2013年4个时间断面的Moran散点图(图3),寻找长江经济带重点控制区域。

由Moran散点图可以看出长江经济带2002~2013年工业废水排放的空间集聚分布状况:

1) HH集聚主要发生于长江下游的华东区域,包括上海、江苏、浙江等省市。华东地区是中国的经济发达区域,城市化水平高工业发达,工业废水排放较高,其中表现突出的城市包括上海、南京、苏州、杭州、无锡。

2) LH区分布较为分散,主要发生于产业类型差异较大或生态环境重点保护的区域,例如十堰、舟山、雅安等。十堰是鄂西生态文化旅游圈的核心城市,同时也是南水北调中线工程调水源头丹江口水库所在地,尤其重视水资源保护。舟山以发展海洋经济为主,雅安是历史文化名城以及新兴的旅游城市,这些城市受城市发展定位和政策的影响,产业分工与周边城市呈现出较大差异,一般为工业限制发展区域,因此工业废水排放比相邻的城市低。

3) HL区主要发生于长江中上游中心城市重庆、武汉、成都等。重庆为中国直辖市之一,武汉、成都为省会城市,经济发展水平比周边城市高,且重庆、武汉均为中国重要的工业基地,因此工业废水排放量明显高于周边城市,这也反映出中西部地区重点城市发展较快,但地区整体发展不均衡,首位度高。

4) LL集聚主要发生于上游云南、贵州两省。该区域位于中国西部,经济发展较为落后,工业水平不高,故工业废水排放低。同时张家界等自然风景区受政策保护,主要发展旅游业,其周边地区经济发展也以旅游业为依托,工业产业较少,因此发生LL集聚。Moran散点图中趋势线斜率逐渐增大,进一步说明工业废水排放的空间分布趋于极化,呈现明显的分异格局。

3 长江经济带工业废水排放的驱动因素分析

通过LMDI模型对影响工业废水排放的各因素进行分解,分别表示为技术改善效应、产业结构效应、经济发展效应和人口规模效应4个方面,绘制驱动因素变化情况图(图4),讨论不同驱动因素对工业废水排放变化的影响。

整体来看,影响长江经济带工业废水排放的因素中:① 经济发展效应2002~2008年变化不大,2008~2009年出现小幅下降,随后迅速回升,2011年后又开始大幅下降,但始终呈现出正贡献量并且居于主导地位。② 产业结构效应在2002~2004

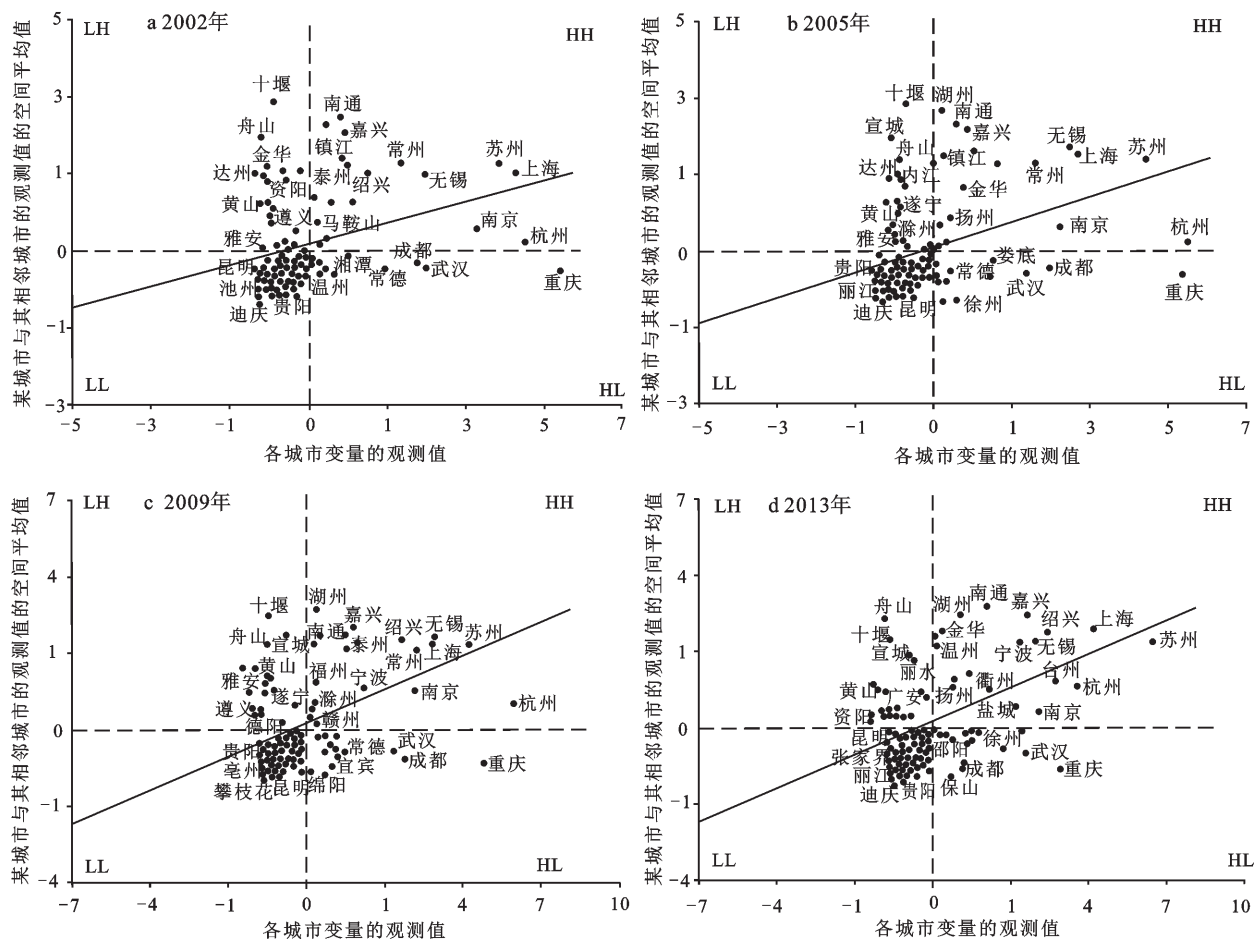


图3 长江经济带城市工业废水排放的Moran散点图

Fig.3 Moran scatter plot of urban industrial waste water discharge in the Yangtze River Economic Zone

年、2005~2007年、2009~2011年为正贡献量,其他年份则为负贡献量,说明产业结构调整对工业废水的影响较为明显。受政策影响,若着重发展第二产业则工业废水排放增加,呈现出正贡献量;若转变经济发展模式,提升第三产业及高新技术产业比重,则工业废水排放明显减少,表现为负贡献量。③ 技术改善效应则一直处于负贡献量,对工业废水排放的抑制作用显著,技术效应对工业废水排放的影响在一定程度上也缓和了由于经济发展不健康所带来的严重废水排放问题。④ 人口规模对工业废水排放的贡献在2002~2013年同样一直处于正贡献量且较为稳定,然而在整体影响结构中仅占极小的份额,对工业废水排放的影响总体来说比较小。由工业废水排放变化量可以看出,长江经济带除2002~2005年工业废水排放呈增长状态,2005年后一直呈下降趋势负增长。即“十一五”规划开展后,国家高度重视长江经济带的可

持续发展问题,随着长江经济带发展战略的提出,更加关注长江生态安全,提出一系列节能减排政策,使长江经济带成为促进经济健康增长的有力推手,为中国经济持续发展提供重要支撑^[34]。

为更详细探究各城市的主要驱动力,选取长江经济带上重要城市,运用LMDI计算2002~2013年各指标对工业废水排放的贡献程度,绘制重点城市各指标贡献量分布图(图5)。

经济发展效应方面,长江经济带各城市工业废水排放都随着经济规模的扩大而增加,但也呈现出明显的地域差异。其中,成都、重庆、武汉、上海及浙江、江苏等省市经济增长对废水排放的贡献较大,而云南、贵州等地由于经济发展水平较低,其对工业废水排放的影响并不显著。张家界、黄山市等因以发展旅游业为主且为风景名胜,要求保护当地生态环境,故经济发展主要以旅游业为依托,并未造成工业废水排放的增加。

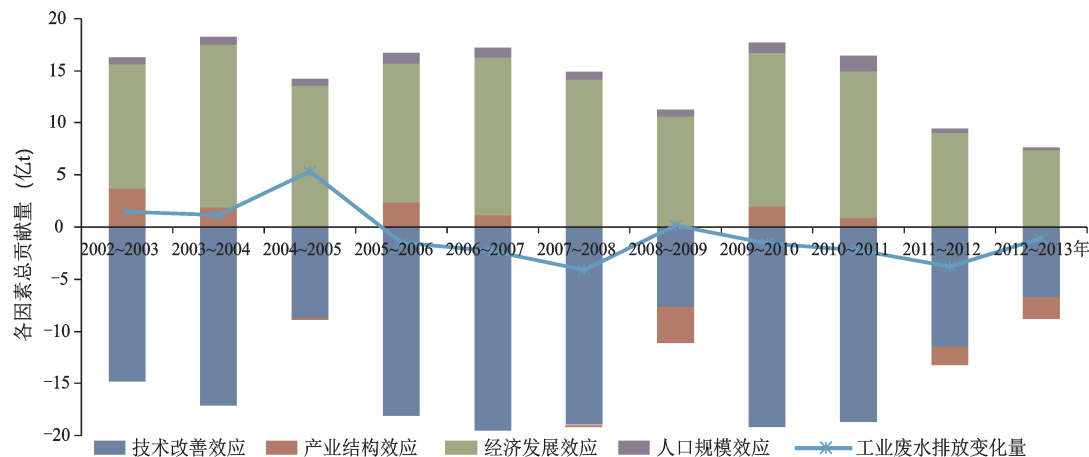


图4 2002~2013年长江经济带工业废水排放驱动因素变化情况

Fig.4 Driving factors of the wastewater discharge in the Yangtze River Economic Zone from 2002 to 2013

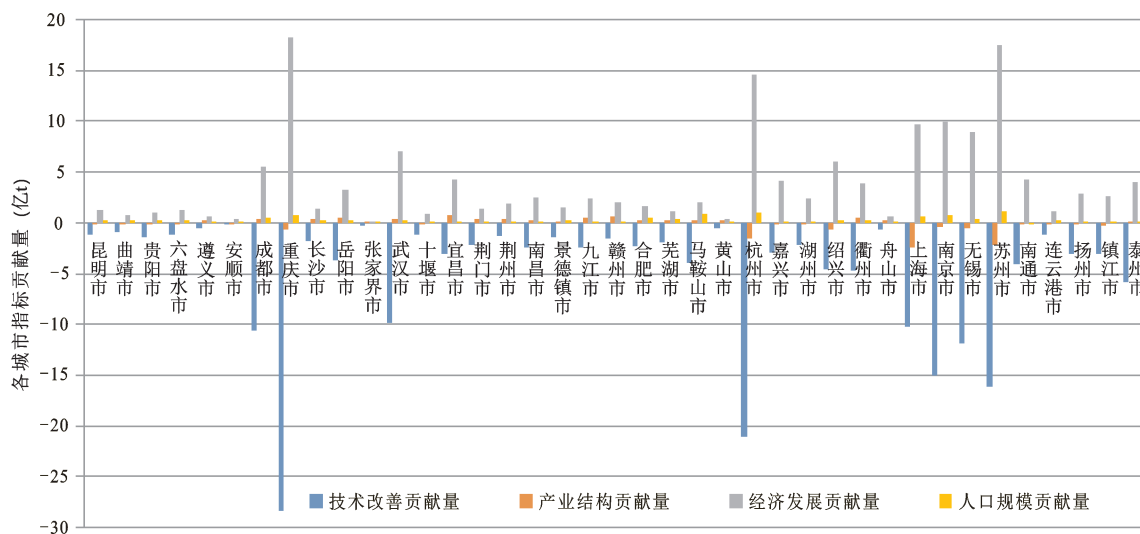


图5 2002~2013年长江经济带重要城市各指标贡献量分布

Fig.5 Comparison of the effect of driving factors on the industrial wastewater discharge in the important cities of the Yangtze River Economic Zone from 2002 to 2013

产业结构效应对工业废水排放的影响存在显著的空间差异。因产业结构调整使得工业废水排放增加的城市多位于湖南、湖北、江西、安徽等省, 这些地区原本工业废水排放较少, 但作为产业转移接收地, 大量高耗能高污染的产业迁移落户^[35], 随着工业增加值占比越来越大, 其对工业废水排放的影响也愈发明显, 在空间上即表现为中排放量城市增多。而传统的工业基地重庆则开始通过产业结构的调整降低自身的排放量, 杭州、上海、南京、无锡、苏州等东部沿海地区城市也在加速转变经济发展模式, 重点发展第三产业及高新技术产业, 工业占比下降, 这些高排放城市的工业废水

排放也随之减少。

技术改善效应一直是控制工业废水排放的重要因素。改善工业企业的生产技术水平, 提高废水处理技术有利于减少工业废水排放对环境的污染, 并对工业废水进行循环利用以减少其排放。从图5中可以看出, 成都、重庆、武汉、杭州、上海、南京、无锡、苏州技术改善效应对工业废水排放的抑制作用显著, 有些甚至超过了经济发展对废水排放的贡献量。这些城市经济发达, 在2002年均均为中高排放以上城市, 但随着技术的改善, 其工业废水排放大幅下降, 说明需注重通过技术提升解决经济发展过程中产生的环境问题。

人口规模效应方面,虽然总体上对工业废水排放的贡献量多为正值,但并不显著,仅重庆、合肥、马鞍山、杭州、上海、南京、苏州等城市可看出人口增长对工业废水排放有明显增加作用。人口规模增加对工业废水排放的贡献主要体现在厂区内人口产生的生活废水与工业废水合并排放^[5],而人口规模增加的更主要贡献在于城市生活废水的排放。上述城市和地区多为工业发达地区或接受工业企业转移的重点地区,其工业发展多为产业园模式,为安置大量外来从业人员,厂区一般配有一定规模的员工宿舍。换言之,新增的人口多集中在工业园区,一定程度上带来了工业废水排放的增加。

4 结论

随着经济发展和快速城镇化、工业化的推进,中国的生态文明建设越来越注重水环境改善和水污染控制。本文以长江经济带2002~2013年工业废水排放为研究对象,从空间分析和因素分解两方面,研究工业废水排放的时空格局演化和驱动因素,得出以下结论:

1) 时空演化方面,时间上长江经济带工业废水排在2002~2005年不断上升,至2005年达到峰值,随后整体呈下降趋势,工业废水排放随经济增长呈现出倒“U”型曲线。空间总体看,长江经济带2002~2013年工业废水排放由上游向下游逐渐增加;从排放格局来看,高排放城市减少,中排放城市增多;从变化趋势看,工业废水排放表现出自下游向中上游转移的趋势,并由大城市向中小城市扩散。

2) 空间关系上,研究期内长江经济带工业废水排放呈现明显的空间集聚状态,工业废水排放的“热”点(高排放集聚)区主要分布于江苏、浙江等经济发达地区,而“冷”点(低排放集聚)区主要分布于云南、贵州等经济欠发达地区。工业废水排放的空间分布趋于极化,且呈现明显的分异格局。

3) 驱动因素方面,通过LMDI模型将影响长江经济带工业废水排放的因素分解为经济发展效应、产业结构效应、技术改善效应和人口规模效应。分析得出,经济发展效应是导致工业废水排放增加的主要因素。产业结构对工业废水排放的贡献量主要受政策影响,若着重发展第二产业则工业废水排放增加,反之则起到抑制作用。技术改善效应对工业废水排放抑制作用较强,且在大城市中尤为显著,因此大城市工业废水排放趋于减少。人口

规模效应造成工业废水增加的来源是与工业废水混排的厂区生活废水,数量较少故影响并不明显。

目前,长江经济带工业废水排放正在逐步降低,这与国家将长江经济带发展成为促进中国经济转型升级的新支撑带,走新型工业化道路,提高工业发展质量和效益的战略决策有着直接关系。同时国家“五年规划”要求建设两型社会,对企业取水排水管控的加强,也对减少工业废水排放起到了重要影响。减排取得一定成效的同时,研究区水污染问题仍较严重且呈分化格局,因此长江经济带建设需要改变发展思路,把修复长江生态环境摆在压倒性位置,加强流域环境综合治理,将长江经济带建设成绿色生态发展带。

参考文献(References):

- [1] Li Q, Song J, Wang E et al. Economic growth and pollutant emissions in China: A spatial econometric analysis[J]. *Stoch Environ Res Risk Assess*, 2014(28): 429-442.
- [2] Mei Y, Feng S. Water pollution in China: Current status, future trends and countermeasures[J]. *Chinese Geographical Science*, 1993, 3(1): 24-35.
- [3] 李涛, 翟秋敏, 陈志凡, 等. 中国水环境保护规划实施效果评估[J]. *干旱区资源与环境*, 2016, 30(9): 25-31. [Li Tao, Zhai Qiumin, Chen Zhifan et al. Evaluation on implementation effect of China's water environmental protection plan. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2016, 30(9): 25-31.]
- [4] Chen Kunlun, Liu Xiaoqiong, Ding Lei 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.
- [5] 李磊, 潘慧玲. 我国工业废水排放量的多元非线性回归预测[J]. *江南大学学报(自然科学版)*, 2011, 10(3): 309-313. [Li Lei, Pan Huiling. Prediction of Industrial Wastewater Discharge Amount Based on Multivariate Nonlinear Regression. *Journal of Jiangnan University (Natural Science Edition)*, 2011, 10(3): 309-313.]
- [6] 苏丹, 王彤, 刘兰岚, 等. 辽河流域工业废水污染物排放的时空变化规律研究[J]. *生态环境学报*, 2010, 19(12): 2953-2959. [Su Dan, Wang Tong, Liu Lanlan et al. Research on the spatio-temporal variation of pollutant discharged from industrial wastewater in the Liaohe River Basin. *Ecology and Environmental Sciences*, 2010, 19(12): 2953-2959.]
- [7] 李慧颖, 杜晓明, 王洪波, 等. 东北三省工业废水污染物排放的时空变化规律研究[J]. *环境科学研究*, 2008, 21(2): 168-174. [Li Huiying, Du Xiaoming, Wang Hongbo et al. Research on the Spatio-Temporal Variation of Industrial Wastewater Pollutants in the Three Provinces of Northeast China. *Research of Environmental Sciences*, 2008, 21(2): 168-174.]

- [8] Geng Y, Wang M, Sarkis J et al. Spatial-temporal patterns and driving factors for industrial wastewater emission in China[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2014, 76(4): 116-124.
- [9] 唐志鹏, 付雪, 周志恩. 我国工业废水排放的投入产出重要系数确定研究[J]. *中国人口·资源与环境*, 2008, 18(5): 123-127. [Tang Zhipeng, Fu Xue, Zhou Zhien. Identify Important Coefficients in China's Sectors of Discharge Amount of Industrial Wastewater China Population, Resources and Environment, 2008, 18(5): 123-127.]
- [10] 李志敏, 廖虎昌. 中国 31 省市 2010 年水资源投入产出分析[J]. *资源科学*, 2012, 34(12): 2274-2281. [Li Zhimin, Liao Huchang. Input and Output Analysis of Water Resources Across China in 2010. *Resources Science*, 2012, 34(12): 2274-2281.]
- [11] Tang Z, Gong P, Liu W et al. Sensitivity of Chinese Industrial Wastewater Discharge Reduction to Direct Input Coefficients in an Input-output Context[J]. *Chinese Geographical Science*, 2015, 25(1): 85-97.
- [12] 周静, 杨桂山. 江苏省工业废水排放与经济增长的动态关系[J]. *地理研究*, 2007, 26(5): 931-939. [Zhou Jing, Yang Guishan. Study on the evolvement of the relationship between industrial wastewater discharge and economic growth in Jiangsu Province. *Geographical Research*, 2007, 26(5): 931-939.]
- [13] 吴昌南, 刘俊仁. 江西省经济增长与工业三废排放水平关系的实证研究[J]. *经济地理*, 2012, 32(3): 146-152. [Wu Changnan, Liu Junren. Analysis on Economic Growth and Industrial Waste Discharge of Jiangxi Province. *Economic Geography*, 2012, 32(3): 146-152.]
- [14] 王立平, 管杰, 张纪东. 中国环境污染与经济增长: 基于空间动态面板数据模型的实证分析[J]. *地理科学*, 2010, 30(6): 818-825. [Wang Liping, Guan Jie, Zhang Jidong. Environmental Pollution and Economic Growth in China: A Dynamic Spatial Panel Data Model. *Scientia Geographica Sinica*, 2010, 30(6): 818-825.]
- [15] 马丽. 基于 LMDI 的中国工业污染排放变化影响因素分析[J]. *地理研究*, 2016, 35(10): 1857-1868. [Ma Li. Decomposition of China's industrial environment pollution change based on LMDI. *Geographical Research*, 2016, 35(10): 1857-1868.]
- [16] 李长嘉, 潘成忠, 雷宏军, 等. 1992~2008 年我国工业废水排放变化效应[J]. *环境科学研究*, 2013, 26(5): 569-575. [Li Changjia, Pan Chengzhong, Lei Hongjun et al. Decomposition Analysis on China's Industrial Wastewater Discharges in 1992-2008. *Research of Environmental Sciences*, 2013, 26(5): 569-575.]
- [17] 李名升, 佟连军, 仇方道. 工业废水排放变化的因素分解与减排效果[J]. *环境科学*, 2009, 30(3): 707-712. [Li Mingsheng, Tong Lianjun, Qiu Fangdao. Factor Decomposition and Reduction Effect on the Changes of Industrial Wastewater Discharge. *Environmental Science*, 2009, 30(3): 707-712.]
- [18] 钟业喜, 冯兴华, 文玉钊. 长江经济带经济网络结构演变及其驱动机制研究[J]. *地理科学*, 2016, 36(1): 10-19. [Zhong Yexi, Feng Xinghua, Wen Yuzhao. The Evolvement and Driving Mechanism of Economic Network Structure in the Changjiang River Economic Zone. *Scientia Geographica Sinica*, 2016, 36(1): 10-19.]
- [19] 方大春, 孙明月. 长江经济带核心城市影响力研究[J]. *经济地理*, 2015, 35(1): 76-81. [Fang Dachun, Sun Mingyue. Influence of Core Cities in Yangtze River Economic Belt. *Economic Geography*, 2015, 35(1): 76-81.]
- [20] 高港区政府办公室. 高港区把修复长江生态环境摆在压倒性位置[N/OL]. 泰州市政府门户网站, 2016-08-01. http://www.taizhou.gov.cn/art/2016/8/1/art_24_626378.html. [Gaogang district government office. The Gaogang district has placed the restoration of the Changjiang River Ecological Environment in an overwhelming position. Taizhou government portal, 2016-08-01. http://www.taizhou.gov.cn/art/2016/8/1/art_24_626378.html.]
- [21] 中华人民共和国国家统计局, 中华人民共和国环境保护部. 中国环境统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2003-2014. [National Bureau of Statistics of the People's Republic of China, Ministry of Environmental Protection of the People's Republic of China. *China Statistical Yearbook on Environment*. Beijing: China Statistics Press, 2003-2014.]
- [22] 中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2003-2014. [National Bureau of Statistics of the People's Republic of China. *China Statistical Yearbook*. Beijing: China Statistics Press, 2003-2014.]
- [23] 中华人民共和国国家统计局. 中国城市统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2003-2014. [National Bureau of Statistics of the People's Republic of China. *China City Statistical Yearbook*. Beijing: China Statistics Press, 2003-2014.]
- [24] 韩楠, 于维洋. 中国工业废气排放的空间特征及其影响因素研究[J]. *地理科学*, 2016, 36(2): 196-203. [Han Nan, Yu Weiyang. Spatial Characteristics and Influencing Factors of Industrial Waste Gas Emission in China. *Scientia Geographica Sinica*, 2016, 36(2): 196-203.]
- [25] 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. [Zhou Kan. Spatial-temporal Differences and Cluster Features of Environmental Pollution in China. *Scientia Geographica Sinica*, 2016, 36(7): 989-997.]
- [26] 齐漫, 陈昆仑, 丁镭, 等. 中国省域生活废水排放量的时空分布特征及驱动因素分析[J]. *地理与地理信息科学*, 2016, 32(4): 106-112. [Qi Man, Chen Kunlun, Ding Lei et al. Spatial-Temporal Patterns and Driving Factors for Household Waste Water Discharge in China. *Geography and Geo-Information Science*, 2016, 32(4): 106-112.]
- [27] Getis A, Ord J K. The analysis of spatial association by the use of distance statistics[J]. *Geographical Analysis*, 1992, 24: 189-206.
- [28] Insulin L. Local indicators of spatial association: LISA[J]. *Geographical Analysis*, 1995, 27: 93-115.
- [29] Ang B W, Zhang F Q, Choi K H. Factorizing changes in energy

- and environmental indicators through decomposition[J]. *Energy*, 1998, 23(6): 489-495.
- [30] Ang B W. The LMDI approach to decomposition analysis a practical guide[J]. *Energy Policy*, 2005, 33(7): 867-871.
- [31] Ang B W. Decomposition analysis for policy making in energy: Which is the preferred method?[J]. *Energy Policy*, 2004, 32(9): 1131-1139.
- [32] Zhao C, Chen B. Driving Force Analysis of the Agricultural Water Footprint in China Based on the LMDI Method[J]. *Environmental Science & Technology*, 2014, 48(21): 12723-12731.
- [33] 刘兆德,虞孝感,谢红彬. 20 世纪 90 年代长江流域经济发展过程分析[J]. *长江流域资源与环境*, 2002, 11(6): 494-499. [Liu Zhaode, Yu Xiaogan, Xie Hongbin. Analysis on The Course of Economic Development Around The Yangtze River Basin in 1990' s. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2002, 11(6): 494-499.]
- [34] 邹辉,段学军. 长江经济带经济-环境协调发展格局及演变[J]. *地理科学*, 2016, 36(9): 1408-1417. [Zou Hui, Duan Xuejun. Pattern Evolution of Economy-environment Coordinated Development in the Changjiang River Economic Belt. *Scientia Geographica Sinica*, 2016, 36(9): 1408-1417.]
- [35] 刘伟. 长江经济带区域经济差异分析[J]. *长江流域资源与环境*, 2006, 15(2): 131-135. [Liu Wei. Regional Economic Disparity of Yangtze Economic Zone. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2006, 15(2): 131-135.]

Spatial-temporal Pattern and Driving Factors of Industrial Wastewater Discharge in the Yangtze River Economic Zone

Chen Kunlun^{1,2}, Guo Yuqi¹, Liu Xiaoqiong¹, Zhang Zuo³

(1. *Faculty of Resources and Environmental Science, Hubei University, Wuhan 430062, Hubei, China*; 2. *Regional Development and Environmental Response Key Laboratory of Hubei Province, Wuhan 430062, Hubei, China*; 3. *Collage of Public Administration, Central China Normal University, Wuhan 430079, Hubei, China*)

Abstract: Using the Exploratory Spatial Data Analysis (ESDA) method and the Logarithmic Mean Divisia Index method (LMDI), this article analyzes the evolution of spatial-temporal pattern of industrial wastewater in the Yangtze River Economic Zone from 2002 to 2013 and the main driving factors affecting industrial wastewater discharge. The study indicates that: 1) In terms of the evolution of temporal pattern, the discharge of industrial wastewater in the Yangtze River Economic Zone increased continuously from 2002 to 2005, reaching the peak in 2005, and then showed a downward trend. As for the evolution of spatial pattern, the discharge of industrial wastewater in the Yangtze River Economic Zone gradually expanded from the upper reaches of Yangtze River to its lower reaches from 2002 to 2013. Regarding the discharge pattern, the high-discharge cities decreased while the medium-discharge cities increased. As for the changing trend, the industrial wastewater discharge tended to transfer from the lower branches of the Yangtze River to the middle and upper reaches, and spread from large cities to small and medium-sized cities. During the study period, the discharge of industrial wastewater in the Yangtze River Economic Zone showed a significant spatial agglomeration. 2) In terms of the driving factors, the economic development effect and the technological development effect are the main factors which lead to the increase and decrease of industrial wastewater discharge respectively. The effect of industrial structure is significant to the industrial wastewater discharge and it leads to the increase or decrease of the industrial wastewater discharge depending on the adjustment of the policy regarding the development of industries. Population effect exerts a little impact on the industrial wastewater discharge. Although the discharge of industrial wastewater in the Yangtze River Economic Zone is gradually decreasing as a whole, the pollution problem is still serious and unbalanced. Therefore, under the background of The Belt and Road Initiative strategy, ideas of developing the Yangtze River Economic Zone should be changed and the comprehensive environmental management of the Yangtze River Basin and ecosystem restoration should be enhanced.

Key words: the Yangtze River Economic Zone; industrial wastewater; spatial-temporal pattern; LMDI