

长江经济带水污染物减排的空间效应及驱动因素

周侃^{1,2}, 伍健雄^{1,2}, 钱者东³, 樊杰¹, 王强^{4*} (1.中国科学院地理科学与资源研究所, 中国科学院区域可持续发展分析与模拟重点实验室, 北京 100101; 2.中国科学院大学资源与环境学院, 北京 100049; 3.生态环境部南京环境科学研究所, 江苏 南京 210042; 4.福建师范大学地理科学学院, 福建 福州 350007)

摘要: 构建 2011~2015 年水污染物排放及社会经济数据库, 选取 COD、氨氮 2 项指标, 解析“十二五”时期长江经济带水污染物的减排过程与时空特征, 并采用空间计量模型定量解析减排空间效应及驱动因素。研究发现: 5 年间长江经济带水污染物减排过程的集聚特征显著, 高排放—高减排区主要位于长江三角洲地区, 而环境效益趋差的高排放—低减排区仍然存在。空间效应对长江经济带水污染物减排具有一定影响, 本地排污增加不利于邻地减排。人口规模、城镇化水平和农业经济份额是驱动长江经济带水污染物排放的主导因素, 到 2015 年, 人口规模和农业经济份额因素的驱动力均有不同程度下降, 但城镇化水平的驱动力仍在提升。外商直接投资和工业化水平分别对 COD 和氨氮排放呈正向驱动, 需警惕外资流入和快速工业化进程给相应特征污染物造成的减排压力。亟需推动本地和邻地就排污标准与减排总量达成规制共识, 协同建立环境准入、污染付费等深层次减排模式; 工程减排的同时共抓结构减排, 针对长江经济带驱动因素与污染排放的空间耦合性, 从源头倒逼产业结构、消费结构、种植结构、资本结构等向清洁化转变。

关键词: 水污染物; 减排过程; 空间效应; 驱动因素; 空间耦合; 长江经济带

中图分类号: X703 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-6923(2020)02-0885-11

Spatial effects on emission reduction of water pollutants and its driving forces in Yangtze River Economic Belt. ZHOU Kan^{1,2}, WU Jian-xiong^{1,2}, QIAN Zhe-dong³, FAN Jie¹, WANG Qiang^{4*} (1.Key Laboratory of Regional Sustainable Development Modeling, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; 2.College of Resources and Environment, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3.Nanjing Institute of Environmental Sciences, Ministry of Ecology and Environment, Nanjing 210042, China; 4.School of Geographical Sciences, Fujian Normal University, Fuzhou 350007, China). *China Environmental Science*, 2020,40(2): 885~895

Abstract: Based on panel dataset of water pollutant emission and socio-economic development in Yangtze River Economic Belt (YREB) during the “Twelfth Five-Year Plan” period, the tempo-spatial evolution and pattern of water pollutants reduction was analyzed. Meanwhile, the spatial effects and driving forces of water pollutant emission reduction were quantitatively estimated by using spatial lag model and spatial error model. Water pollutant emissions reduction presented a significant agglomeration in the YREB, and the high emission-high emission reduction zones were mainly distributed in the Yangtze River Delta. However, the high emission-low emission reduction zones that were being threatened by environmental degradation as the rapid socioeconomic development, still exist, then it was urgent to accelerate the adjustment of industrial structure and the elimination of outdated production capacity, and fully implement the strict controls on emissions by existing standards. The geographical distribution of water pollutant emissions had a significant impact on its reduction in the YREB, namely, increase in water pollutants emission in a place would lead to nonsignificant reduction in water pollutants emission in adjacent areas. However, through exert the environmental control during the “Twelfth Five-Year Plan” period, the trend of coordinated emission reduction emerged since 2015. Population size, the percentage contribution of agriculture in GDP, and urbanization level were the major driving factors behind the variation of water pollutant emissions in the YREB. By 2015, the effects of former two factors worn off, while urbanization still had an increasing influence on the growth of water pollutants emissions. This finding reflected the ongoing urbanization in YREB should be given an urgent attention in the future. In addition, foreign direct investment and industrialization level played a positive role in the increases in chemical oxygen demand and ammonia nitrogen emissions, respectively. In this case, it was necessary to be alert to the rapid FDI inflows and industrialization that may increase the burden of reducing water pollutants emissions. Finally, main policy implications were presented as follows: it was crucial to jointly removing the spillover effect of distribution of water pollutants emissions, and promoting local and their adjacent regions to reach regulatory consensus on pollution standard and total scale. Moreover, establishing deep-level emission reduction models, such as environmental access mechanisms, pollution payment policies, and cross-border early-warning systems, should be constructed and promoted. Besides the implementation of project emission

收稿日期: 2019-07-21

基金项目: 中国科学院战略性先导科技专项(A类)(XDA23020101);国家自然科学基金项目(41971164, 41971159)

* 责任作者, 副教授, wangqiang_1102@126.com

reductions laws and policies, the structural emission reductions should be reinforced. Aiming at the spatial coupling of driving factors and pollution emissions, we should shift the structures of industries, consumption, planting, and capital to the cleaner ones.

Key words: water pollutant; emission reduction process; spatial effect; driving factor; spatial coupling; Yangtze River Economic Belt

目前,对区域水污染物排放的研究主要聚焦在排放强度的时空演进特征及其驱动因素方面.时空演进研究一般采用一个或多个特征水污染物指标,对包括国家尺度、流域尺度、省域尺度在内的排放强度进行测度和分解,并解析时空特征和演变规律.国家尺度的研究表明,水污染物排放存在显著的空间相关性^[1-3],分流域与分省域分析也表现出显著空间集聚,呈现城市群地区为排放强度高值簇,并向外围地区排放强度逐渐降低的圈层分布模式^[4-5].一直以来,长江经济带的水污染物排放量长期居高不下,水生态环境状况形势严峻,已严重制约了长江经济带的可持续发展进程.在针对长江经济带的实证研究中,研究者从省域层面探究了工业废水排放的空间差异^[6-7],发现水污染物排放存在从上游到下游增加、由大城市向中小城市扩散的梯度规律,也发现具有明显空间集聚过程^[8].

在水污染物排放的驱动因素研究方面,早期研究主要关注收入水平或经济发展水平同水污染物排放的倒“U”形曲线关系^[9],并提出了“环境库兹涅茨曲线假说”.随着空间计量模型引入,通过指数分解法、结构分解法、协整检验、利用截面或面板数据的定量解析,近年来对驱动因素的探究逐渐深入,考虑的指标除经济指标外还包括了产业集聚、产业结构、用地扩张等方面.高爽等^[10]、张珊珊等^[11]发现污染密集型制造业倾向于向郊区和环境容量大的地区集聚;王晓硕等^[12]认为空间集聚带来的技术外部性是减少工业污染排放的主要因素;蒯鹏等^[13]得出规模效应是工业污染减排的重要驱动力;Liu 等^[14]指出工业化水平提高将促进工业源污染物排放减少.以上研究表明,区域间的污染物排放具有示范效应,特别是污染密集型产业集聚将造成区域性水环境污染,尽管水环境治理能在一定程度上遏制污染态势恶化,但效果仅限于集聚程度较低的地区.大量实证研究还显示,社会与制度因素对污染物排放的驱动方式具有复杂性,一般而言,城市化、人口密度、财政分权对污染物排放具有显著正向驱动,技术进步则被广泛认为是促进水污染物减排的重要因

素^[15-19].在针对长江经济带的驱动因素研究中,还发现市场化和工业化对工业废水排放的正向驱动作用,而产业结构高级化有利于水污染物减排^[20-22].

既有研究侧重对污染排放强度进行解析,而对主要水污染物的减排过程关注偏少;在研究尺度上,通常采用的分析空间单元以流域和省域尺度为主,需加强地市级尺度下的污染物排放特征与驱动机制研究;同时,由于上游地区的污染产业集聚会抵消下游的环境治理成效^[23],需强化上中下游、干流支流等流域减排特征及驱动力研究,为多尺度精准制定水环境治理和水污染物减排对策提供科学依据.本文构建长江经济带水污染物排放和社会经济数据库,选取 COD、氨氮 2 项水污染物排放指标,通过对 2011~2015 年减排格局解析,研究“十二五”时期长江经济带水污染物的减排过程,并利用空间滞后模型和空间误差模型,定量解析水污染物减排的空间效应及驱动因素.

1 数据来源与研究方法

1.1 研究区概况与数据来源

长江经济带覆盖 11 个省市,包括重庆、四川、贵州、云南的上游地区,江西、湖北、湖南的中游地区,上海、江苏、浙江、安徽的下游地区,区域总面积约 205 万 km^2 ^[24].2016 年末,长江经济带常住人口 6.1 亿,国内生产总值 37.56 万亿元,分别占当年全国的 44.12%和 50.68%,长期以来是全国社会经济格局的战略重心^[25].与此同时,长江经济带水污染物排放总量大、强度高,在全国 21%的国土面积上却承载了 40%以上的废水排放量.2015 年,长江经济带 COD 和氨氮排放量分别占全国总量的 36.48%和 47.49%^[26].

本文构建了 2011~2015 年地市单元的长江经济带水污染物排放和社会经济数据库.地市单元即为长江经济带地级及以上行政单元,共计 127 个,包括上海、重庆 2 个直辖市和其他 125 个地级市、州.其中,各类水污染物排放量、人口规模、经济发展水平、工业化水平、农业经济份额、外商直接投资、固定资产投资等数据来自《中国区域经济统计年

鉴》^[27],城镇化水平数据来自《中国城市统计年鉴》^[28],对部分指标数据缺失的地市单元,进一步获取所在省份或地市单元的统计年鉴逐个补齐。

1.2 研究方法

1.2.1 Getis-Ord G^* 指数与热点分析 为探索长江经济带水污染物减排量的集聚与分散格局,采用 Getis-Ord G^* 指数表征是否存在统计显著的高值簇(热区)与低值簇(冷区), G^* 指数计算如公式(1)所示:

$$G_i^* = \sum_{j=1}^n W_{ij}(d) Y_j / \sum_{j=1}^n Y_j \quad (1)$$

式中: n 为样本数($n=127$), Y_j 为 j 地市单元的污染物减排量, W_{ij} 为空间权重矩阵的相应要素。当 i 不等于 j 时, G_i^* 的标准表达形式为:

$$Z(G_i^*) = [G_i^* - E(G_i^*)] / \sqrt{\text{Var}(G_i^*)} \quad (2)$$

式中: $E(G_i^*)$ 和 Var 分别为 G_i^* 的期望值和标准差。若 $Z(G_i^*)$ 为正且显著,表明地市单元 i 周围的值相对较高,属高值集聚的热点区;若 $Z(G_i^*)$ 为负且显著,则表明属低值集聚的冷点区。

1.2.2 空间计量模型估计 为将空间效应(空间相关性和空间异质性)纳入到长江经济带水污染物减排驱动因素分析,采用空间滞后模型(SLM)和空间误差模型(SEM)两种空间计量模型进行回归分析^[29-30]。其中,空间滞后模型采用空间滞后项评估空间相互作用,分析水污染物排放对邻近地市的空间效应,其模型表述为:

$$Y = \rho W_y + \beta X + \varepsilon \quad (3)$$

式中: Y 为被解释变量; X 为外生解释变量矩阵; ρ 为空间回归系数,用来反映空间依赖程度; β 为待估系数; W 为空间权重矩阵; W_y 为空间滞后因变量; ε 为随机误差向量。

而空间误差模型采用空间误差项评估空间相互作用,测算邻近地市被解释变量的误差冲击对本地市的影响程度,其模型表述为:

$$Y = \beta X + \varepsilon, \varepsilon = \lambda W \varepsilon + \mu \quad (4)$$

式中: Y 为被解释变量; X 为外生解释变量矩阵; ε 为随机误差向量; β 为待估系数; λ 为空间误差系数,用来反映存在于误差项之中的空间依赖程度; $W \varepsilon$ 为误差项的空间权重矩阵; μ 为白噪声。

1.2.3 双变量空间自相关分析 首先,采用空间自相关分析方法,研究水污染物减排可能存在的空间关联特征。其中,全局空间自相关是对属性值在整个

区域空间特征的描述,用以衡量区域整体上的空间关联程度,常用 Moran's I 指数来度量,可用公式(5)表示^[31]:

$$I = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n W_{ij} (Y_i - \bar{Y})(Y_j - \bar{Y})}{S^2 \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n W_{ij}} \quad (5)$$

式中: S^2 为污染物减排量的方差值,Moran's I 的取值范围为 $[-1,1]$,大于0表示存在空间正相关,小于0为负相关,等于0则表明不具有相关性,呈随机分布状态。

为进一步刻画主要影响因素与污染物排放的空间耦合关系,在 Moran's I 指数的基础上拓展了双变量全局和局部自相关分析,其定义如公式(6)所示:

$$I_{lm}^p = Z_l^p \sum_{q=1}^n W_{pq} Z_m^q \quad (6)$$

式中: $Z_l^p = (X_l^p - \bar{X}_l) / \sigma_l$, $Z_m^q = (X_m^q - \bar{X}_m) / \sigma_m$, X_l^p 是空间单元 p 对应属性 l 的值, X_m^q 是空间单元 q 对应属性 m 的值, $\bar{X}_l$ 和 $\bar{X}_m$ 分别是属性 l 和 m 的平均值, σ_l 和 σ_m 分别是属性 l 和 m 的方差, W_{pq} 为空间单元 p 、 q 之间的空间连接矩阵^[32]。

2 结果与讨论

2.1 水污染物减排的空间变化特征

2.1.1 减排态势与流域特征 由表1可知,2011~2015年长江经济带主要水污染物减排明显,COD排放量从2011年的 $906.00 \times 10^4 \text{t}$ 减少至2015年的 $811.19 \times 10^4 \text{t}$,氨氮排放量从 $111.90 \times 10^4 \text{t}$ 减少至 $99.83 \times 10^4 \text{t}$,两类水污染物的减排率分别为10.46%和10.81%,略低于全国11.06%、11.71%的减排率。上中下游统计显示,下游地区的减排过程较为突出,其COD和氨氮的减排量分别为 $45.83 \times 10^4 \text{t}$ 、 $5.65 \times 10^4 \text{t}$,减排率分别达到14.03%、13.08%,均高于上游和中游地区。其中,上海、浙江、江苏三省市COD的减排率依次为20.16%、16.48%、15.36%,氨氮减排率依次为15.0%、14.3%、12.3%,位居长江经济带减排率前3位。采用污染物减排贡献度,即局部地区污染物减排量/污染物总减排量 $\times 100\%$,分析局部地区对整体减排的贡献程度。测算结果显示,下游地区减排贡献度分别为48.34%、46.81%,而中游地区为28.33%、32.31%,上游地区仅为23.33%、20.88%,表明长江经济带的减排主要来自下游地区。

表 1 2011~2015 年长江经济带水污染物减排统计
Table 1 Statistics on water pollutant emission reduction

地区	COD			氨氮		
	减排量(10^4 t)	减排率(%)	减排贡献度(%)	减排量(10^4 t)	减排率(%)	减排贡献度(%)
上游地区	22.12	8.46	23.33	2.52	8.46	20.88
中游地区	26.86	8.45	28.33	3.90	10.03	32.31
下游地区	45.83	14.03	48.34	5.65	13.08	46.81
长江经济带	94.81	10.46	100.00	12.07	10.79	100.00

2.2.2 减排格局与时空过程 按污染物减排贡献度 <0 (即污染物排放量增加地市)、 $0\sim0.5\%$ 、 $0.5\%\sim1\%$ 、 $1\%\sim1.5\%$ 和 $\geq1.5\%$ 由低到高进行分级,结果如图 1 所示.整体上看,长江经济带全域的水污染物均有不同程度的减排.其中,减排贡献度 $\geq1.5\%$ 的地区主要分布在中下游地区的武汉、杭州、上海等特大城市及其邻近地市.分流域分析显示,下游地区的 COD 减排贡献度 $\geq1.5\%$ 的地市占比达到 33.05%,远高于中游地区的 10.89%和上游地区的 11.48%;氨氮减排贡献度高于 1.5%的地市在下游和中游地区占比分别为 26.48%和 22.25%,高于上游地区的 11.48%,可见下游地区对长江经济带减排具有主要贡献.结合干支流分析还发现,干流两岸的地市单元

减排较之支流更加明显,前者的 COD 和氨氮减排量分别为 6598t 和 940t,后者减排量分别为 4933t 和 649t.从分布上看,长江干流及主要干支流交汇区是水污染物排放强度高、减排贡献度大的聚集分布区.值得注意的是,仍有局部地区在 5 年间的水污染物减排贡献度小于 0,呈污染物排放增加态势.主要分布于中上游地区,包括黄山、抚州、怀化、湘西、甘孜、凉山、六盘水、安顺、毕节、黔南、昆明、丽江、迪庆等 13 个地市.尽管这类地区污染物排放强度偏低,但由于地处生态安全屏障功能较重要的干支流上游,需要充分重视其污染排放增长趋向,从严实施产业发展环境准入制度的同时,强化水污染物处理与水环境治理能力.

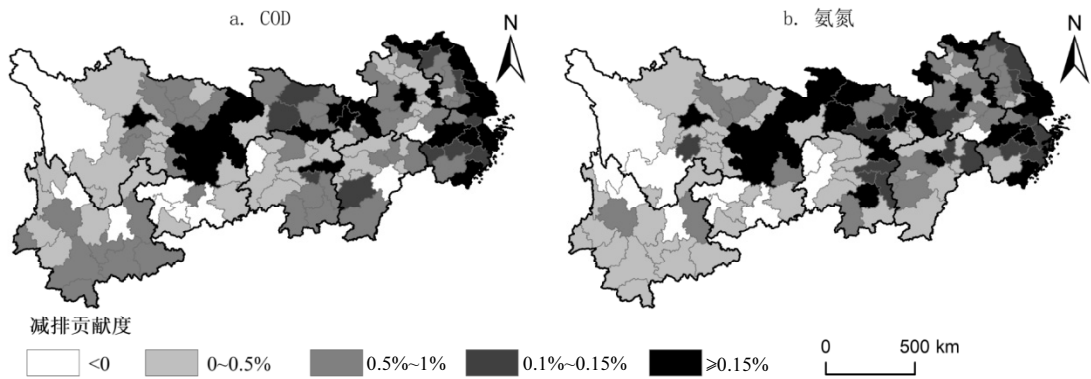


图 1 2011~2015 年长江经济带水污染物减排贡献度空间分布
Fig.1 Contribution rates of water pollutants emission reductions

2.3.3 减排热点与空间关联 对水污染物减排量的全局 Moran's I 指数测算显示,在 2011~2015 年间,COD、氨氮减排量的 Moran's I 指数分别为 0.309 和 0.217,且均通过显著性检验($p<0.01$),表明长江经济带水污染物减排存在空间正相关性,即空间集聚特征显著.进一步计算减排量的 Getis-Ord G^* 指数,并按自然断点法(Jenks)将 G^* 指数从高到低分为热

点区、次热区、次冷区和冷点区 4 种类型(图 2),发现 COD、氨氮减排量的高值簇和低值簇集聚现象十分显著,且热度从上游到下游整体递增,下游地区热度显著高于上游地区.污染物减排的热点区均分布在长三角地区,包括上海、南通、嘉兴、苏州等;次热点区主要分布在热点区周围的江苏与浙江两省,以及中游地区的湖北、湖南等省份;上游地区主要为

冷点区和次冷点区分布。

进一步识别水污染物排放基数与减排量的空间关联模式,即高排放—高减排、低排放—低减排的空间正相关,或者低排放—高减排、高排放—低减排的空间负相关。结果显示,COD 的高排放—高减排区包括上海、南通、盐城、泰州、苏州、嘉兴、绍兴等,氨氮的高排放—高减排区包括上海、南通、苏州、嘉兴、绍兴、台州、九江、荆州等,该类地区经济集聚水平高、产业开发密度大,同时水污染物排放强度高、排污基数大,但由于“十二五”时期减排政策与管控力度增强,目前已取得较好减排效果。低排放—低

减排区主要分布在川西和滇西北地区,尽管区内人口稀疏、经济密度也相对较低,生产生活方式以低污染排放为主,但需注意针对城镇人口和企业个体的减排管控。对于资阳、鄂州、湖州、台州等处于环境效益趋好的低排放—高减排区,可对其实施以鼓励类政策为主的环境引导手段。同时,也要看到,长江经济带还分布有少量高排放—低减排地市,包括中游地区的上饶、怀化以及上游地区的曲靖、成都等,对这类环境效益趋差的高排放—低减排区,需加快产业结构调整 and 落后产能淘汰,加强限制类环境管控,严控超标准和超总量排污,切实降低区域性环境负荷。

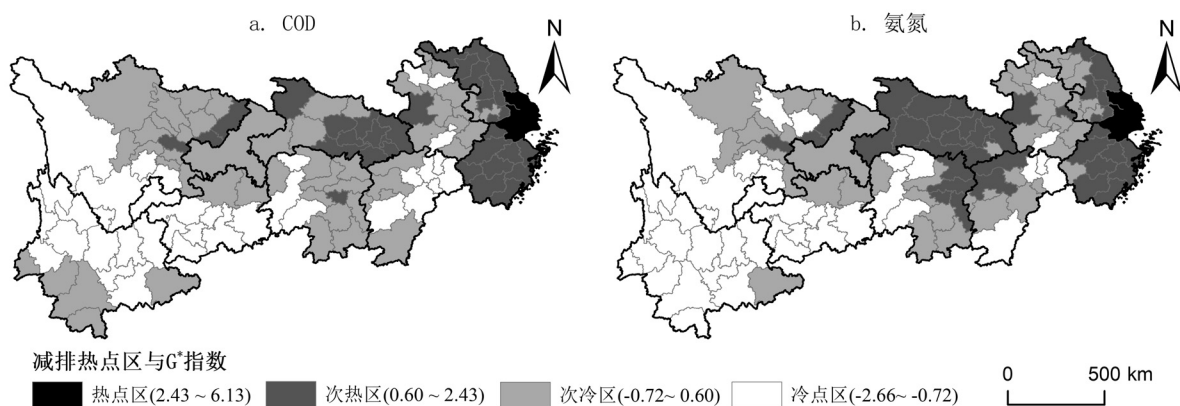


图2 长江经济带水污染物减排量的热区分布

Fig.2 Hotspots map of water pollutant emission reduction

2.2 水污染物减排的空间效应及影响因素

2.2.1 模型设定与检验 借鉴既有研究的回归模型设定经验^[33-34],兼顾地市单元数据可获得性,选取2011年和2015年的COD和氨氮排放量作为被解释变量,选取反映人口规模、城镇化水平、经济发展水平、工业化水平、农业经济份额、外商直接投资规模、固定资产投资规模的指标作为解释变量,分析地市单元主要水污染物同社会经济格局的基本关系,并采用对数形式降低异方差和非平稳性。最终设定的影响因素回归模型如下:

$$\ln QPD_i = \alpha + \beta_1 \ln TP_i + \gamma_1 \ln UR_i + \delta_1 \ln PGDP_i + \zeta_1 \ln IS_i + \eta_1 \ln AP_i + \theta_1 \ln FDI_i + \mu_1 \ln FAI_i + \varepsilon_i \quad (7)$$

式中:QPD_i代表COD或氨氮排放总量(t),反映各地市单元的污染物排放水平;TP_i代表年末常住人口数量(万人),反映各地市单元的人口规模;UR_i代表城镇化率(%),反映各地市单元的城镇化水平;PGDP_i代表

人均GDP(元/人),反映各地市单元的经济发展水平;IS_i则代表第二产业增加值占GDP的比重(%),反映产业结构与工业化水平;AP_i代表第一产业增加值在GDP中的比重(%),反映各地市单元的农业经济在国民经济所占份额;FDI_i则代表外商直接投资额(万美元),反映外商直接投资规模;FAI_i则代表全社会固定资产投资额(亿元),反映固定资产投资规模; ε_i 为误差项。

全局和局部空间相关性检验已经表明,长江经济带污染物排放与减排格局存在空间相关性,不宜采用传统OLS估计方法,而应从空间计量角度验证空间自相关性及其影响程度,即按公式(3)、公式(4)进行空间滞后模型(SLM)或空间误差模型(SEM)估计。空间计量模型的检验结果如表2所示,通过两类LM检验(LM-Lag检验和LM-Error检验)及其稳健LM检验(Robust LM-Lag检验和

Robust LM-Error 检验)来判断模型适用性.根据 Anselin 等提出的判别准则^[35],除 2015 年 COD 排放空间滞后模型的稳健 LM 检验外,其余 LM 检验及其稳健 LM 检验均在 1%水平下显著($P<0.01$),

两类空间计量模型均适用于本研究问题,因此对两类通过检验的模型均进行分析说明.为兼顾 2 个年度影响因素的可比性,着重对 SEM 模型回归结果进行对比阐释.

表 2 空间相关性检验结果
Table 2 The test results of spatial correlation

检验方法	COD 模型				氨氮模型			
	2011 年		2015 年		2011 年		2015 年	
	统计量	概率	统计量	概率	统计量	概率	统计量	概率
Moran's I(Error)	2.6824	0.0073	4.1853	0.0000	3.6587	0.0003	4.7699	0.0000
LM-Lag	5.0935	0.0240	3.1461	0.0761	8.7854	0.0030	6.1181	0.0134
Robust LM-Lag	3.7358	0.0533	1.3117	0.2521	6.1183	0.0134	2.7822	0.0953
LM-Error	4.1844	0.0408	12.7495	0.0004	8.7452	0.0031	16.9942	0.0000
Robust LM-Error	2.8267	0.0927	10.9151	0.0010	6.0780	0.0137	13.6584	0.0002

注:Moran's I (Error)为空间误差模型的空间自相关指数,LM-Lag 和 Robust LM-Lag为适合空间滞后模型的拉格朗日乘数检验统计量,LM-Error和 Robust LM-Error为适合空间误差模型.

2.2.2 空间效应估计 如表 3 所示,空间效应对长江经济带水污染物减排具有一定影响.在 2011 年和 2015 年度的 4 个 COD 和氨氮 SLM 模型中,空间滞后项 ρ 值均为正值,且在统计上十分显著.这意味着在长江经济带地市层面,水污染物排放量在邻近地理空间上存在正向溢出效应,即本地排污增加的同时还会引起邻地排污增加,导致这种空间溢出效应的原因可能在于:一方面,由于邻近地区通常处于同一区域经济分工体系中,本地与邻地在产业结

构、生产成本和市场等方面具有共性,若本地污染密集型产业难以清洁化,邻地的减排同样处于不利局面;另一方面,尽管近年来地方政府纷纷加强了环境规制,并对跨界地区出台了更加严格的管控政策,一些污染密集型产业通过重新选址以降低环境治理成本,但是污染就近转移效应仍然普遍存在,事实上在规模收益递增、消费者偏好与物流成本等因素的共同作用下,污染密集型产业即使重新选址,也不太可能往邻地以外的区域做大尺度的空间转移.

表 3 2011~2015 年 COD、氨氮模型的参数估计结果
Table 3 The results of spatial econometric models for COD and NH₃-N emission

水污染物	变量	2011 年				2015 年			
		SLM 模型		SEM 模型		SLM 模型		SEM 模型	
		系数	P 值	系数	P 值	系数	P 值	系数	P 值
COD	空间滞后项 ρ	0.0525**	0.0237			0.0435**	0.0768		
	空间误差项 λ			0.3500***	0.0023			0.4459***	0.0000
	α	-2.0885**	0.0653	-0.9696	0.4019	-1.8181	0.1443	0.3072	0.8066
	lnTP	1.0336***	0.0000	1.0549***	0.0000	0.9079***	0.0000	0.8665***	0.0000
	lnUR	0.3236***	0.0008	0.3409***	0.0012	0.6435***	0.0062	0.4732**	0.0444
	lnPGDP	0.5166***	0.0000	0.4505***	0.0001	0.2229**	0.0936	0.1230	0.3465
	lnIS	0.0273	0.8501	0.1468	0.3376	0.2141	0.1185	0.2212	0.1135
	lnAP	0.5086***	0.0000	0.4271***	0.0000	0.4917***	0.0000	0.3935***	0.0000
	lnFDI	-0.0004	0.9842	-0.0149	0.5390	0.0526**	0.0085	0.0573***	0.0035
	lnFAI	-0.0973**	0.0277	-0.1093**	0.0239	-0.0360	0.7036	-0.0067	0.9401
	R^2	0.8852		0.8886		0.8696		0.8843	
	logL	-6.2278		-5.9527		-10.5576		-5.7790	
	AIC	30.4555		27.9053		39.1153		27.5580	
	SC	55.9821		50.5956		64.6418		50.2482	

续表 3

水污染物	变量	2011 年				2015 年			
		SLM 模型		SEM 模型		SLM 模型		SEM 模型	
		系数	P 值	系数	P 值	系数	P 值	系数	P 值
氨氮	空间滞后项 ρ	0.0705***	0.0030			0.0673**	0.0136		
	空间误差项 λ			0.4575***	0.0000			0.5403***	0.0000
	α	-5.0112***	0.0000	-3.2204***	0.0015	-4.7352***	0.0000	-2.3992**	0.0418
	lnTP	1.1583***	0.0000	1.1624***	0.0000	1.0721***	0.0000	1.0234***	0.0000
	lnUR	0.2932***	0.0005	0.3400***	0.0003	0.7834***	0.0004	0.7069***	0.0012
	lnPGDP	0.5584***	0.0000	0.4294***	0.0000	0.2657**	0.0333	0.1242	0.3057
	lnIS	0.1404	0.2656	0.2612**	0.0520	0.3160**	0.0150	0.3139**	0.0165
	lnAP	0.4192***	0.0000	0.3277***	0.0000	0.3843***	0.0000	0.3232***	0.0000
	lnFDI	-0.0088	0.6577	-0.0218	0.3055	0.0269	0.1534	0.0278	0.1243
	lnFAI	-0.1263***	0.0011	-0.1371***	0.0013	-0.1085	0.2238	-0.0786	0.3324
	R^2	0.9256		0.9304		0.9018		0.9172	
	logL	10.9358		12.1613		-3.2599		3.2623	
	AIC	-3.8716		-8.3226		24.5198		9.4754	
	SC	21.6550		14.3676		50.0464		32.1657	

注:***、**和*分别表示显著性水平为0.01、0.05和0.1。

进一步比较 ρ 值发现,这种空间效应随污染物和时间的不同而存在差异,氨氮排放的空间相关性强于 COD 排放;同时,2015 年的空间溢出效应较之 2011 年减弱,表明在“十二五”时期,长江经济带环境协同管控逐步加强,区域水污染物协同减排趋势初步显现.SEM 模型的空间误差项 λ 值还表明,在不考虑其他因素的情况下,相邻地市的 COD 和氨氮排放量增加,将通过误差项产生正向波及效应.2015 年对相邻地市 COD、氨氮排放的正向波及程度分别为 0.4459%和 0.5403%,表明水污染物排放的空间效应不仅仅来源于其自身的空间自相关性,也来源于未被观测到解释变量的空间自相关性。

2.2.3 影响因素估计 COD 和氨氮 SEM 模型估计显示,2012~2015 年间,对水污染物排放均具有显著正向驱动的因素为人口规模、城镇化水平和农业经济份额,表明在“十二五”时期,长江经济带水污染物排放受这 3 个主导因素的作用.在 2011 年,lnTP 每提高 1%,将引起 COD 增加 1.0549%、氨氮增加 1.1624%,lnUR 每提高 1%,将引起 COD 增加 0.3409%、氨氮增加 0.34%,由此可见,人口规模具有较强的驱动作用,是水污染物排放格局的控制性因素,特别是当城镇居民生活方式为较高污染排放强度时,人口集中分布将显著提高排放集中度、增加处理设施的运行负荷,致使水污染物减排存在巨大压力.此外,lnAP 每提高 1%,将引起 COD 增加 0.4271%、氨氮增加 0.3277%,意味着农业经济比重

增大,将使长江经济带的水污染物减排压力增加,亟待从源头入手实施农业清洁生产和生态循环农业,推广控氮控磷施肥技术,鼓励生物农药、低毒低残留农药使用,以合理种植养殖和科学施肥施药抑制农业面源污染物排放。

从其变化来看,人口规模和农业经济份额因素的驱动力有不同程度下降,到 2015 年,COD SEM 模型中,lnTP、lnAP 的弹性系数分别降至 0.8665、0.3935,氨氮 SEM 模型中则降至 1.0234、0.3232,反映了“十二五”时期居民生产生活的单位排污强度降低、治污工程加快建设,对水污染物减排的积极作用已经显现.但是,城镇化水平因素对水污染物排放的驱动力仍在提升,lnUR 对 COD、氨氮排放的弹性系数增至 2015 年的 0.4732 和 0.7069.结合“十二五”时期长三角地区、长江中游地区、成渝地区等城市群区域连片污染问题突出的现实,表明城镇化进程依靠高耗水、高耗能等增量扩张的发展模式还在持续,过快人口城镇化导致水污染物减排受限。

按公式(6)测算 3 类主导因素与水污染物排放的空间耦合性,可揭示 2011~2015 年各主导因素对水污染物高强度集聚排放的驱动作用.由图 4 可知,人口规模与水污染物排放呈高人口规模—高排放空间正相关的地区为长三角地区的上海、苏中和苏北,湖南中部和南部,以及四川内江、达州 2 市,特别在湖南境内,“十二五”时期人口规模因素对水污染物

集聚高排放态势的驱动作用尤为突出.在城镇化与水污染物排放方面,高城镇化—高排放的地市仍以长三角地区为主,零星分布于湖南中部和湖北荆州、十堰 2 市.在农业经济份额与水污染物排放方面,高农业份额—高排放的地市集中分布在江苏北部、四川北部、湖南中部和湖北南部.综合分析可发现,长

三角地区受到人口规模和城镇化因素的双重驱动,在上海、苏州、南通、连云港、淮安、盐城、扬州、宿迁和绍兴等地市,两因素对水污染物排放均为高—高集聚区;在湖南的衡阳、邵阳、岳阳、益阳、永州、娄底 6 市,则呈现人口规模和农业经济份额因素的双重驱动.

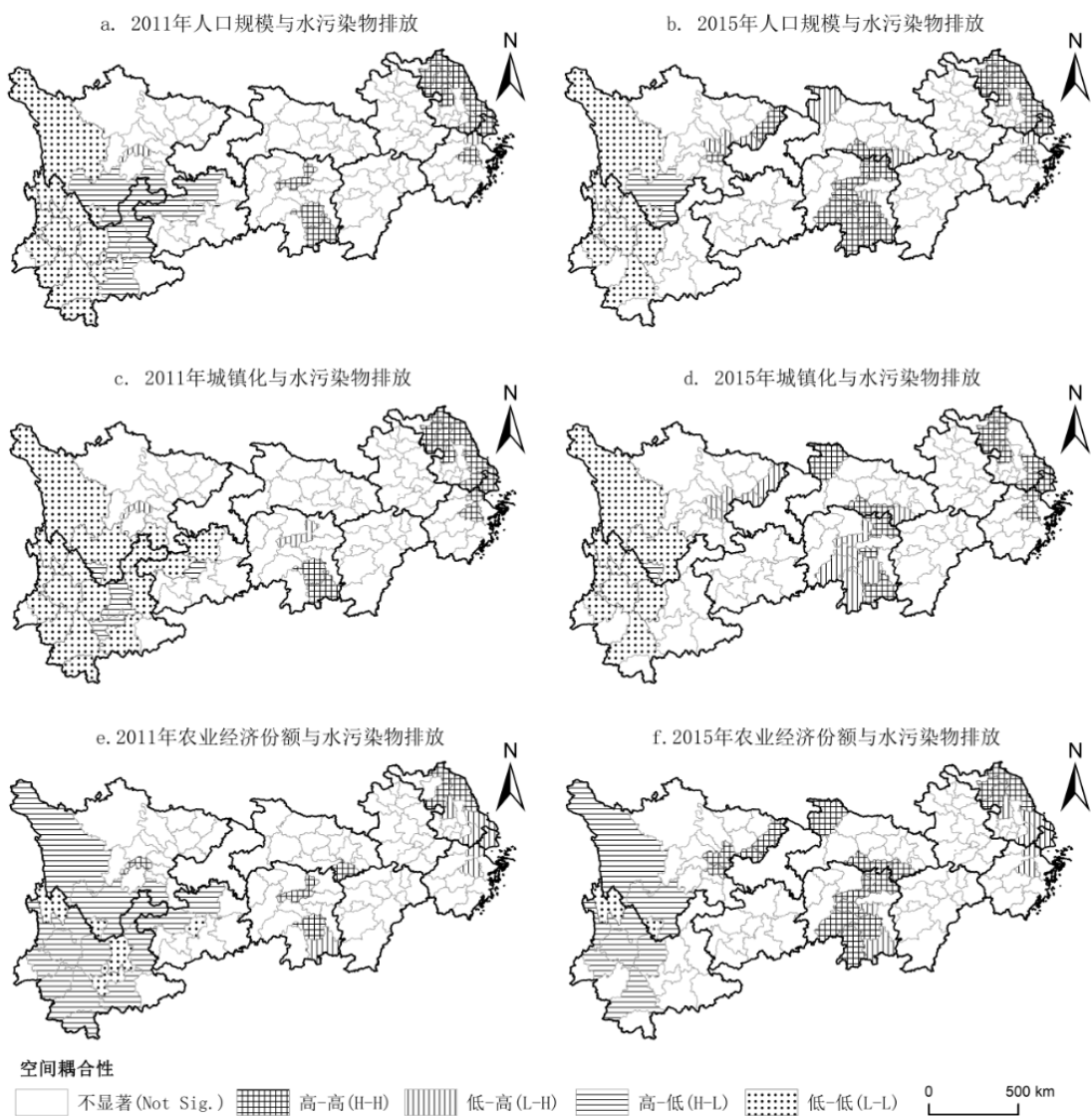


图3 2011~2015 年主导因素与水污染物排放的空间耦合性

Fig.3 Spatial coupling between dominant factors and water pollutant emissions

除上述影响污染物减排的主导因素外,其他因素的影响还包括:经济发展水平因素,随着人均 GDP 增加,主要水污染物排放量将同时增加,在 2011 年的 SLM 模型中,lnPGDP 变量对 COD 和氨氮的弹性系数分别为 0.5166、0.5584,到“十二五”期末时,两类污染物的弹性系数分别降至 0.2229、0.2657.对照污染物排放与经济发展之间的环境库兹涅茨倒“U”型曲

线假说,表明在“十二五”时期长江经济带经济发展与水污染排放的强耦合已有所减缓,具备了进入倒“U”型曲线拐点、实现二者良性循环的有利条件.工业化水平因素,在氨氮 SEM 模型中,工业化水平因素在“十二五”时期均呈现出对氨氮排放的显著驱动作用,2011 年 lnIS 变量的弹性系数为 0.2612,2015 年增至 0.3139,表明了长江经济带快速工业化进程增加

了氮氮的减排负担,需要通过产业结构调整改变高能耗、高污染的粗放生产方式,降低工业发展的能源消耗和氮氮排放强度,制定针对重点氮氮排放工业企业的减排政策。外商投资因素,在 CODSEM 模型中,2011 年 $\ln FDI$ 变量在统计上不显著,但到 2015 年为显著且弹性系数为 0.0573,说明了需要警惕 FDI 流入对长江经济带水环境造成的负面影响,应针对高 COD 排放的外资企业,通过更严格生产经营活动中的环保处置标准和减排规划,防止跨国公司在长江经济带寻求“污染避难所”。

2.3 讨论

基于水污染物减排空间效应及驱动因素分析的政策启示:共除污染治理中的空间溢出效应,本地和邻地需就排污标准与减排总量达成规制共识,协同建立环境准入、污染付费、跨界预警等深层次减排模式;实施工程减排的同时需共抓结构减排,针对驱动因素与污染排放的空间耦合性,从源头倒逼产业结构、消费结构、种植结构、资本结构等向清洁化转变;共用水污染减排的经济杠杆,采用按浓度和总量并重的排污收费制度,跨区域推动环境容量价值化,倒逼节能减排技术改造和污染企业关停并转迁。未来研究有待深化的方面包括:需进一步揭示污染物在上下游、左右岸、干支流、跨边界等流域属性下的减排格局与时空变化;需加强环境规制对污染物减排作用强度和过程的定量估计;此外,由于目前地市层面数据获取限制,本文选取的研究时间序列偏短,未来可在第二次全国污染源普查基础上完善时空面板数据,以进一步开展长时间序列的机制研究。

3 结论

3.1 2011 以来,长江经济带水污染物减排效果显著,COD、氨氮分别减排 10.46%和 10.79%,减排高值区在长江干流及干支流交汇区集中分布。热点分析显示,长江经济带水污染物减排呈空间集聚态势,高排放—高减排区位于长江三角洲地区,该类区经济集聚水平高、产业开发密度大,同时水污染物排放强度高、排污基数大,由于减排政策与管控力度增强,“十二五”时期的减排效果良好。而环境效益趋差的高排放—低减排区仍然存在,亟待加快产业结构调整 and 落后产能淘汰,严控各类生产生活源头超浓

度和超总量排污。

3.2 空间效应对长江经济带水污染物减排具有一定影响,本地排污增加不利于邻地减排。这种空间溢出效应的成因可能是本地与邻地在产业结构、生产成本和市场等方面具有共性,若本地污染密集型产业难以清洁化,邻地的减排同样处于不利局面;此外,在规模收益递增、消费者偏好与物流成本等因素的共同作用下,污染就近转移效应仍存在,污染密集型产业更倾向于向邻地转移。2015 年的空间溢出效应较之 2011 年减弱,表明在“十二五”时期环境协同管控趋强,区域水污染物的协同减排趋势初步显现。

3.3 5 年间,人口规模、城镇化水平和农业经济份额是驱动长江经济带水污染物排放的主导因素。到 2015 年,人口规模和农业经济份额对水污染物排放的驱动力均有不同程度下降,但城镇化水平的驱动力仍在提升,反映出城镇化进程尚未转变高耗水、高耗能等增量扩张模式,长江经济带的过快人口城镇化导致水污染物减排受限。主导因素与水污染物排放的空间耦合性分析表明,高人口规模—高排放区包括长三角地区、湖南中部和南部,高城镇化—高排放区仍以长三角地区为主,高农业份额—高排放区集中分布在江苏北部、四川北部、湖南中部和湖北南部。

3.4 从经济发展水平因素来看,人均 GDP 增加导致水污染物排放增加,对照环境库兹涅茨倒“U”型曲线表明,“十二五”时期,长江经济带经济发展与水污染物排放的强耦合已有所减缓,具备了进入倒“U”型曲线拐点、实现二者良性循环的有利条件。此外,外商直接投资、工业化水平因素分别对 COD 和氨氮排放具有驱动作用,需警惕外资流入和快速工业化进程给相应特征污染物造成的减排压力。

参考文献:

- [1] Li Q, Song J P, Wang E R, et al. Economic growth and pollutant emissions in China: a spatial econometric analysis [J]. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 2014,28(2):429-442.
- [2] 徐林清,聂楠. 污染物排放的空间集聚及其影响因素:基于岭回归模型的分析 [J]. *生态经济*, 2015,31(5):160-165.
Xu L Q, Nie N. Spatial agglomeration and influencing factors of pollutant emissions: The analysis based on ridge regression model [J]. *Ecological Economy*, 2015,31(5):160-165.
- [3] 文广明. 中国化学需氧量排放强度的空间计量分析 [D]. 桂林:广西师范大学, 2017.

- Wen G M. A Spatial econometric analysis of chemical oxygen demand emission intensity in China [D]. Guilin: Guangxi Normal University, 2017.
- [4] 周 侃,樊 杰,刘汉初.环渤海地区水污染物排放的时空格局及其驱动因素 [J]. 地理科学进展, 2017,36(2):171-181.
Zhou K, Fan J, Liu H C. Spatiotemporal patterns and driving forces of water pollutant discharge in the Bohai Rim Region [J]. Progress in Geography, 2017,36(2):171-181.
- [5] 孙玉阳,宋有涛,王慧玲,等.中国六大流域工业水污染治理效率研究 [J]. 统计与决策, 2018,34(19):100-104.
Sun Y Y, Song Y T, Wang H L, et al. Research on the governance efficiency of industrial water pollution of six major river basins in China [J]. Statistics & Decision, 2018,34(19):100-104.
- [6] 汪克亮,刘 悦,史利娟,等.长江经济带工业绿色水资源效率的时空分异与影响因素:基于 EBM-Tobit 模型的两阶段分析 [J]. 资源科学, 2017,39(8):1522-1534.
Wang K L, Liu Y, Shi L J, et al. Yangtze River Economic Zone spatial and temporal disparities in industrial green water resource efficiency and influencing factors based on two-step analysis of EBM-Tobit Model [J]. Resources Science, 2017,39(8):1522-1534.
- [7] 王宇昕,余兴厚,熊 兴.长江经济带污染物排放强度的空间差异及影响因素研究 [J]. 西部论坛, 2019,29(3):104-114.
Wang Y X, Yu X H, Xiong X. Study on spatial difference and influencing factors of pollutant emission intensity in the Yangtze River Economic Belt [J]. West Forum, 2019,29(3):104-114.
- [8] 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 K L, Guo Y Q, Liu X Q, et al. Spatial-temporal pattern and driving factors of industrial wastewater discharge in the Yangtze River Economic Zone [J]. Scientia Geographica Sinica, 2017,37(11):1668-1677.
- [9] Grossman M, Krueger B. Economic growth and the environment [J]. Quarterly Journal of Economics, 1995,110(2):353-377.
- [10] 高 爽,魏也华,陈 雯,等.发达地区制造业集聚和水污染的空间关联:以无锡市区为例 [J]. 地理研究, 2011,30(5):902-912.
Gao S, Wei Y H, Chen W, et al. Study on spacial-correlation between water pollution and industrial agglomeration in the developed region of China: A case study of Wuxi City [J]. Geographical Research, 2011,30(5):902-912.
- [11] 张姗姗,张 磊,张落成,等.苏南太湖流域污染企业集聚与水环境污染空间耦合关系 [J]. 地理科学, 2018,38(6):954-962.
Zhang S S, Zhang L, Zhang L C, et al. Coupling relationship between polluting industrial agglomeration and water environment pollution in Southern Jiangsu of Taihu Lake Basin [J]. Scientia Geographica Sinica, 2018,38(6):954-962.
- [12] 王晓硕,宇超逸.空间集聚对中国工业污染排放强度的影响 [J]. 中国环境科学, 2017,37(4):1562-1570.
Wang X S, Yu C Y. Impact of spatial agglomeration on industrial pollution emissions intensity in China [J]. China Environmental Science, 2017,37(4):1562-1570.
- [13] 蒯 鹏,束克东,成润禾.我国工业部门环境污染排放变化的驱动因素——基于“十二五”工业排放数据的实证研究 [J]. 中国环境科学, 2018,38(6):2392-2400.
Kuai P, Shu K D, Cheng R D. Driving force for the variation of pollution discharge in the Chinese industrial department: An empirical study based on pollution data during the 12th five-year plan period [J]. China Environmental Science, 2018,38(6):2392-2400.
- [14] Liu S X, Zhu Y M, Wang W Q, et al. The environmental pollution effects of industrial agglomeration: A spatial econometric analysis based on Chinese city data [J]. International Journal of Agricultural and Environmental Information Systems, 2019,10(3):14-29.
- [15] 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.
Hu Z Q, Miao J M, Miao C H. Agglomeration characteristics of industrial pollution and their influencing factors on the scale of cities in China [J]. Geographical Research, 2016,35(8):1470-1482.
- [16] 文 扬,马 中,吴语晗,等.京津冀及周边地区工业大气污染排放因素分解——基于 LMDI 模型分析 [J]. 中国环境科学, 2018,38(12):4730-4736.
Wen Y, Ma Z, Wu Y H, et al. Factors decomposition of industrial air pollutant emissions in Beijing-Tianjin-Hebei region and surrounding areas based on LMDI model analysis [J]. China Environmental Science, 2018,38(12):4730-4736.
- [17] 汪克亮,孟祥瑞,杨 力,等.我国主要工业省区大气污染排放效率的地区差异、变化趋势与成因分解 [J]. 中国环境科学, 2017,37(3):888-898.
Wang K L, Meng X R, Yang L, et al. The regional differences, changing trends and causes decomposition of atmospheric pollution emissions efficiency of China's major industrial provinces. China Environmental Science, 2017,37(3):888-898.
- [18] 胡 妍,李 巍.区域用水环境经济综合效率及其影响因素——基于 DEA 和 Malmquist 指数模型 [J]. 中国环境科学, 2016,36(4):317-322.
Hu Y, Li W. A study of water environment-economy integrated efficiency and its driving factors for regional water use based on a combination of DEA and Malmquist index [J]. China Environmental Science, 2016,36(4):1275-1280.
- [19] Liu J M, Chen X, Wei R C. Socioeconomic drivers of environmental pollution in China: A spatial econometric analysis [J]. Discrete Dynamics in Nature and Society, 2017:1-13.
- [20] 孙博文,程志强.市场一体化的工业污染排放机制:长江经济带例证 [J]. 中国环境科学, 2019,39(2):868-878.
Sun B W, Cheng Z Q. Research on industrial pollution discharge mechanism of market integration: Taking the Yangtze River Economic Belt as an Example [J]. China Environmental Science, 2019,39(2):868-878.
- [21] 柳梦焮,夏良科.城镇化加剧了环境污染吗:基于长江经济带 110 个城市面板数据的经验分析 [J]. 科技与管理, 2017,19(5):49-55.
Liu M T, Xia L K. Did urbanization worsen environmental pollution: an empirical analysis based on the panel data of 110 cities in the Yangtze River Economic Belt [J]. Science-Technology and Management, 2017,19(5):49-55.
- [22] 汪彩娥,汪彩虹.长江经济带产业结构调整污染减排效应研究 [J]. 河南科技大学学报(社会科学版), 2018,36(4):75-82.
Wang C E, Wang C H. Pollution reduction effect of industrial structure adjustment in Yangtze River Economic Zone [J]. Journal of Henan

- University of Science and Technology (Social Science), 2018,36(4): 75-82.
- [23] 卢 越. 产业集聚对流域水污染的影响分析: 以海河流域为例 [J]. 北京交通大学学报(社会科学版), 2019,18(2):61-68.
- Lu Y. Effects of industrial agglomeration on river basin pollution: a case of Haihe River Basin [J]. Journal of Beijing Jiaotong University (Social Sciences Edition), 2019,18(2):61-68.
- [24] 推动长江经济带发展领导小组办公室. 走进长江: 经济社会发展概况. [EB/OL]. (2019-07-13). http://cjjjd.ndrc.gov.cn/zoujinchangjiang/jingjishehuifazhan/201907/t20190713_941469.htm.
- Office of the Leading Group for the Development of the Yangtze River Economic Belt. Into the Yangtze River: Overview of economic and social development. [EB/OL]. (2019-07-13). http://cjjjd.ndrc.gov.cn/zoujinchangjiang/jingjishehuifazhan/201907/t20190713_941469.htm.
- [25] 国家统计局. 中国统计年鉴 [M]. 北京: 中国统计出版社, 2017.
- National Bureau of Statistics of China. China statistical yearbook [M]. Beijing: China Statistics Press, 2017.
- [26] 国家统计局, 环境保护部. 中国环境统计年鉴 [M]. 北京: 中国统计出版社, 2016.
- National Bureau of Statistics of China, Ministry of Environmental Protection of China. China statistical yearbook on environment [M]. Beijing: China Statistics Press, 2016.
- [27] 国家统计局国民经济综合统计司. 中国区域经济统计年鉴 [M]. 北京: 中国统计出版社, 2011-2016.
- Department of Comprehensive Statistics of National Bureau of Statistics of China. China statistical yearbook for regional economy [M]. Beijing: China Statistics Press, 2011-2016.
- [28] 国家统计局城市社会经济调查司. 中国城市统计年鉴 [M]. 北京: 中国统计出版社, 2011-2016.
- Department of Urban Surveys of National Bureau of Statistics of China. China City Statistical Yearbook [M]. Beijing: China Statistics Press, 2011-2016.
- [29] 赵小凤, 黄贤金, 张兴榆, 等. 区域 COD、SO₂ 及 TSP 排放的空间自相关分析: 以江苏省为例 [J]. 环境科学, 2009,30(6):1580-1587.
- Zhao X F, Huang X J, Zhang X Y, et al. Application of spatial autocorrelation analysis to the COD, SO₂ and TSP emission in Jiangsu Province [J]. Environmental Science, 2009,30(6):1580-1587.
- [30] Wartenberg D. Multivariate spatial correlation: a method for exploratory geographical analysis [J]. Geographical Analysis, 1985, 17(4):263-283.
- [31] Anselin L. Spatial econometrics: methods and models [M]. Berlin: Springer Netherlands, 1988.
- [32] 蒋 伟, 赖明勇. 空间相关与外商直接投资区位决定: 基于中国城市数据的空间计量分析 [J]. 财贸研究, 2009,20(6):1-6.
- Jiang W, Lai M Y. Spatial dependence and FDI location determinants: Spatial econometrical analysis based on Chinese urban data [J]. Finance and Trade Research, 2009,20(6):1-6.
- [33] 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 K. Spatial-temporal differences and cluster features of environmental pollution in China [J]. Scientia Geographica Sinica, 2016,36(7):989-997.
- [34] Ehrlich P R, Holdren J P. Impact of population growth [J]. Science, 1971,171(3977):1212-1217.
- [35] Anselin L. and Florax R. J. Small sample properties of tests for spatial dependence in regression models: Some further results [M]. Berlin: Springer-Verlag, 1995:21-74.

作者简介: 周 侃(1986-),男,云南丽江人,副研究员,博士,研究方向为资源环境承载力与区域可持续发展.发表论文 50 余篇.