

经济集聚对区域水污染物排放的影响及溢出效应

周侃^{1,2}, 王强³, 樊杰^{1,2}

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101; 2. 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; 3. 福建师范大学地理科学学院, 福州 350007)

摘要: 基于化学需氧量和氨氮排放数据集, 构建影响因素计量模型, 探讨经济集聚同水污染物排放的影响效应及其在不同规模城镇下影响程度的差异性, 采取双变量空间自相关解析中国经济集聚对水污染物排放的溢出效应, 以期为促进经济集聚与污染减排良性互动提供参考。结论如下: (1) 从全国总体样本来看, 经济集聚能有效降低区域水污染排放强度, 经济集聚度每增长1个百分点, 化学需氧量和氨氮排放将分别减少0.491%和0.166%; (2) 经济集聚对中小城市水污染排放的减排效应更为突出, 在化学需氧量估计模型中, 中等城市、小城市样本的经济集聚度弹性系数分别为-0.679、-0.546, 而大城市及特大城市样本仅为-0.252; (3) 经济集聚同水污染物排放的空间溢出效应显著, 且呈现高集聚—高排放、低集聚—低排放、低集聚—高排放等空间关联模式, 其中, 高集聚—高排放区从京津冀向山东半岛绵延分布, 还包括哈长城市群、苏北和苏中、长株潭、珠三角等地区。政策启示包括: 积极培育中小城市并发挥其经济集聚的减排效应, 促进生产技术更新和扩散, 提高能源利用效率和环保投入; 合理控制大城市经济与人口规模, 加快产业结构调整和落后产能淘汰, 强化环境规制以防止“污染避难所”效应; 遏制经济集聚对水污染物排放的溢出效应, 重点推进高集聚—高排放区联防联控和流域共治。

关键词: 经济集聚; 城镇规模; 水污染物; 减排效应; 溢出效应

改革开放以来, 中国经济高速和超高速增长, 已使环境系统承受的压力越来越大^[1-2], 突出反映在水环境承载力逼近环境容量上限, 水污染问题已严重制约着区域人居品质的提升且对国民身体健康构成威胁^[3]。解决环境容量超载问题需要加大环境保护与整治力度, 还需实行经济发展方式转型^[4-5]。因此, 正确把握经济发展与环境污染之间的耦合关系, 充分认识经济集聚对水污染物排放的影响效应, 既可为制定水污染综合防治手段提供参考, 还能为提出环境友好型经济发展路径奠定科学依据。

目前, 对经济发展与污染排放关系的研究, 主要聚焦在经济增长及对外贸易、资本投资、消费等要素对污染排放的影响上。研究显示, 经济发展水平与污染排放存在倒“U”形曲线关系^[6-7], 中国仍处于二者同步上升阶段^[8-9], 环境质量仍未随经济增长而改善; 研究还证实了国家间、省域间环境污染存在显著的溢出效应, 且污染物排放与经济活动同向集聚加剧环境污染^[10-13]。通常, 在区域经济发展过程中, 打造产业聚集区来拉动

收稿日期: 2018-11-10; 修订日期: 2019-03-20

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41501139, 41671126); 国家自然科学基金重点项目 (41530634); 中国科学院科技服务网络计划 (STS计划) 项目 (KFJ-STZ-ZDTP-021)

作者简介: 周侃 (1986-), 男, 云南丽江人, 博士, 副研究员, 硕士生导师, 研究方向为资源环境承载力与区域可持续发展。E-mail: zhoukan2008@126.com

通讯作者: 王强 (1982-), 男, 河北邯郸人, 博士, 副教授, 研究方向为能源地理学和区域空间规划。
E-mail: wangqiang_1102@126.com

经济增长是各地共同的产业政策取向,以期通过经济活动的空间集聚获得各种溢出和规模经济等收益。针对经济集聚与污染排放关系这一命题,既有研究主要从二者影响机制的理论分析、以及影响程度的实证研究展开。前者通过理论推导、加入环境变量的均衡模型演绎等方式,刻画了作用关系及其外部性特征^[14-15]。实证研究则存在两种观点:一方面,认为经济集聚伴随产业规模扩张,污染物排放就可能增加。流域、省域层面面板数据显示经济集聚会导致环境恶化^[16-18],特别是工业经济的集聚过程加剧水体和空气污染^[19-20],微观层面的分析也证实了制造业集聚和水污染的关联性^[21-22]。另一方面,也有学者发现经济集聚的减排效应,认为经济集聚能够促进技术进步与技术扩散,为环保型生产技术、污染处理设施集中提供可能^[23-25],集聚还有利于劳动生产率及经济发展水平提升,推动实施更严格的环境规制降低污染^[26-29]。总之,经济集聚对污染物排放的影响具有多重性,不同经济发展水平的经济集聚所对应的污染排放强度可能存在差异,而选取的污染物指标不同也会产生不同的研究结论。

不难看出,既有实证研究,尺度多以国家或省域单元为主,来自城市尺度的证据偏少,同时,相比运用赫芬达尔指数、空间基尼系数、泰尔指数等指标的宏观尺度研究,城市尺度的经济集聚能相对精确地反映经济活动在地域空间内的集中程度,且更容易捕捉空间溢出效应。为此,本文基于化学需氧量和氨氮排放数据集,构建影响因素计量模型,探讨地级城市单元经济集聚对水污染物排放的影响效应,并解析在不同规模城镇下影响程度的差异性,以期深化污染物排放影响机理的研究。进一步地,针对经济集聚同水污染物排放空间耦合关系研究的不足,采取双变量空间自相关等方法,研究经济集聚对污染排放的空间溢出效应及模式,并特重点关注邻近地区经济集聚对本地水污染排放的影响,为制定更精细的经济协同发展和产业布局优化、促进经济集聚与污染减排良性互动的对策建议提供参考。

1 研究方法 with 数据来源

1.1 数据来源与处理

本文采用数据包括水污染物排放数据和人口经济统计数据。根据地表水环境质量标准、国家“十三五”节能减排方案的控制要求,选取化学需氧量、氨氮两项指标。前者是水体中可氧化物质被全部氧化所需的化学氧化剂数量,是反映水体有机污染状况的综合指标;后者是水体中各形态氮危害最大的一种,会导致水体富营养化概率增加^[30-31]。污染物排放数据从《中国环境统计年鉴》《中国环境年鉴》等获取,社会经济数据来自《中国区域经济统计年鉴》《中国城市统计年鉴》等,部分数据不完整的亦通过所在省份及城市单元统计年鉴补齐。如无特别说明,数据时间年份均为2015年度。因2015年地级城市单元的城镇化率指标缺失,并考虑到城镇化率的短期变动相对较小^[32]以及数据权威性和可获得性,采用2010年度开展的第六次全国人口普查中,城镇人口占总人口的比例反映城镇化水平。此外,行政区划数据从国家基础地理信息系统网站获取,地级及以上城市单元共339个,包括4个直辖市和其他335个地级市或自治州、盟以及省直辖单位。因数据缺失,研究样本未包括台湾省、香港和澳门特别行政区。

1.2 研究方法

1.2.1 影响因素计量模型设定

选取化学需氧量和氨氮排放量作为被解释变量,结合水污染物排放空间特征,兼顾

全国地级城市单元数据可得性,将经济集聚度作为解释变量,并运用对数形式以降低异方差和非平稳性。因此,将影响因素计量模型设定如下:

$$\ln WPD_i = \alpha + \beta_i \ln EA_i + \gamma_i \ln PGDP_i + \delta_i \ln IS_i + \zeta_i \ln TP_i + \eta_i \ln UR_i + \varepsilon_i \quad (1)$$

式中: WPD_i 代表化学需氧量或氨氮排放量,反映各地级城市单元的水污染物排放水平(t); EA_i 代表经济集聚度,经济集聚反映经济活动在地域空间内的集中程度,因通常刻画经济集聚的指标未考虑微观尺度下地理单元差异所产生的空间偏倚。鉴于此, Ciccone 等^[33]、刘习平等^[34]、张翠菊等^[35]发现,相对于上述指标,单位面积城市土地上的 GDP 产出更能衡量城市经济活动的集聚程度,同时, GDP 中包含了农业产值,但农业产值更多地是在耕地、园地等农业空间实现。因此,借鉴生产密度模型^[36],将农业产出从 GDP 中剥离进行经济集聚度计算,即通过非农部门产值除以城镇用地面积(万元/km²),当单位城镇面积上的非农部门产出增加,也就说明区域经济集聚程度提高。

在确定经济集聚度为解释变量后,在 STIRPAT 模型框架的基础上^[37-39],选取控制影响水污染排放的其他因素,将经济发展水平、产业结构、人口规模、城镇化水平作为其他解释变量: $PGDP_i$ 表示人均 GDP,反映各地级城市单元的经济发展水平(万元/人); IS_i 表示第二产业增加值占 GDP 的比例,反映产业结构与工业化水平(%); TP_i 表示年末常住人口数量,反映人口规模(万人); UR_i 表示城镇化率,反映城镇化水平(%); ε_i 表示误差项。

1.2.2 空间自相关分析

采取空间自相关分析方法研究经济集聚同水污染物排放的空间溢出效应。一方面,运用单变量全局空间自相关描述属性值在整个区域的空间特征,以衡量区域整体上的空间关联程度,常用莫兰指数(Moran's I)来度量^[40],可用下式表示:

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

式中: S^2 为水污染物排放量的方差值,即 $S^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2$; n 为样本数($n=339$); Y_i 和 Y_j 分别为 i 区域和 j 区域单元的水污染物排放量; W_{ij} 为空间权重矩阵的相应要素。再通过局部空间自相关 Getis-Ord G_i^* 指数反映污染物排放、经济集聚度指标自身的集聚或离散格局,探索是否存在统计显著的高值簇(热区)与低值簇(冷区)等背景信息, G_i^* 的计算公式为^[41]:

$$G_i^* = \sum_{j=1}^n W_{ij}(d) Y_j / \sum_{j=1}^n Y_j \quad (3)$$

当 i 不等于 j 时, G_i^* 的标准表达形式为:

$$Z(G_i^*) = [G_i^* - E(G_i^*)] / \sqrt{\text{Var}(G_i^*)} \quad (4)$$

式中: $E(G_i^*)$ 和 $\sqrt{\text{Var}(G_i^*)}$ 分别表示 G_i^* 的期望值和方差; W_{ij} 表示空间权重矩阵,采用邻近标准确定。当 $Z(G_i^*)$ 为正且显著时,表明评价单元 i 周围的值相对较高,属于高值集聚的热点区域;当 $Z(G_i^*)$ 为负且显著时,表明属低值集聚的冷点区域。

另一方面,为刻画经济集聚同水污染物排放之间的溢出模式,采用双变量全局和局部自相关分析,其定义如下:

$$I_{lm}^p = Z_l^p \times \sum_{q=1}^n W_{pq} \times Z_m^q \quad (5)$$

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 表示空间单元 p 对应属性 l 的值; X_m^q 表示空间单元 q 对应属性 m 的值; \bar{X}_l 和 \bar{X}_m 分别表示属性 l 和 m 的平均值; σ_l 和 σ_m 分别表示属性 l 和 m 的方差; W_{pq} 表示空间单元 p 、 q 之间的空间连接矩阵。

2 结果分析

2.1 经济集聚对区域水污染物排放的影响程度

按照假设的影响因素回归模型,运用普通最小二乘法(OLS)进行参数估计,化学需氧量和氨氮排放的估计与检验结果如表1、表2所示。除分析全国所有样本数据外,为考察回归系数的稳健性,还对沿海地区、内陆地区样本分别进行了估计;为考察不同规模城镇下经济集聚对水污染物排放的影响效应差异,参考国家关于调整城市规模划分的标准,并兼顾样本数量,对地级城市单元按照常住城镇人口规模进行等级划分,将常住城镇人口小于50万人的纳入小城市样本、50万~100万人的纳入中等城市样本、大于等于100万人的纳入大城市及特大城市样本进行分类估计^[42-43]。

2.1.1 经济集聚对水污染物排放影响的总体估计

在总体以及沿海、内陆样本参数估计中,方差分析的概率值均为0.000,小于0.01的显著性水平,Durbin-Watson ($D.W$) 值均在1.6~2.4之间,被解释变量为 $\ln\text{COD}$ 时,三类样本估计调整后 R^2 依次为0.796、0.712和0.809,被解释变量为 $\ln\text{NH}_3\text{-N}$ 时,调整后 R^2 依次为0.896、0.822和0.899,说明OLS模型通过显著性检验、且不存在异方差性,模型的拟合程度较高。参数估计结果发现(表1):总体样本模型中,经济集聚在一定程度上减轻了区域水污染排放强度。无论被解释变量为 $\ln\text{COD}$ 还是 $\ln\text{NH}_3\text{-N}$,也无论样本为总体还是沿海、内陆,经济集聚度变量的估计系数均为负值,且除沿海样本外均在0.01的显著性水平上均通过检验。

具体来看,经济集聚度每增长1个百分点,全国地级城市单元的化学需氧量排放将减少0.491%、氨氮排放将减少0.166%,均显示经济集聚过程具有显著的污染减排效应。这表明经济集聚促进区域资源消耗和能源利用方式整体改善,有利于减排和治污技术扩散,便于环保部门对污染排放过程的集中监管,且能够降低治污成本、促进治污专业化,从而减少了污染排放强度。对于内陆地区而言,经济集聚水平越高、污染物排放强度越低,经济集聚度每增长1个百分点,其化学需氧量和氨氮排放将分别减少0.526%、0.211%。因此,加强经济集聚是改善区域环境状况的有效手段,特别是在内陆地区经济集聚度偏低(4.358亿元/ km^2)的情况下。但经济集聚度较高的沿海地区(6.962亿元/ km^2),当大量的产业活动集中在有限的空间时,特别是诸如制造业等易产生污染的产业集聚,制造与生产过程中伴生的水污染物总量和强度也随之增加,经济集聚形成的规模污染效应被放大,需通过调整产业结构,形成低耗能、低排放的产业体系才能有助于改善区域环境质量。

除经济集聚因素外,工业化程度、人口规模等因素则对水污染排放具有正向驱动。

表1 总体样本以及沿海地区、内陆地区样本的参数估计结果

变量	总体样本				沿海样本				内陆样本			
	被解释变量	lnCOD	被解释变量	lnNH ₃ -N	被解释变量	lnCOD	被解释变量	lnNH ₃ -N	被解释变量	lnCOD	被解释变量	lnNH ₃ -N
constant	5.217***	9.745	1.325***	3.382	7.676***	7.354	4.581***	5.804	4.190***	5.966	0.813*	1.568
lnEA	-0.491***	-6.675	-0.166***	-3.074	-0.167	-1.325	-0.031	-0.328	-0.526***	-5.754	-0.211***	-3.128
lnPGDP	0.283***	3.259	-0.100	-1.571	-0.034	-0.309	-0.223***	-2.709	0.534***	4.486	0.019	0.219
lnIS	0.306***	2.719	0.423***	5.129	0.472**	2.457	0.193	1.327	0.010	0.067	0.383***	3.527
lnTP	1.062***	30.712	1.043***	41.195	0.852***	14.565	0.859***	19.404	1.128***	26.735	1.0883***	34.933
lnUR	0.184	1.566	0.653***	7.588	-0.299	-1.568	0.322**	2.233	0.071	0.476	0.5613***	5.064
P值	0.000		0.000		0.000		0.000		0.000		0.000	
F值	262.421		578.192		50.436		93.255		198.852		418.460	
调整后R ²	0.796		0.896		0.712		0.822		0.809		0.899	
D.W值	1.724		1.961		1.865		2.310		1.698		2.010	

注：***、**和*分别表示显著性水平为0.01、0.05和0.1；括号内数据为t检验数，下同。

表2 不同规模城市样本的参数估计结果

变量	大城市及特大城市样本				中等城市样本				小城市样本			
	被解释变量	lnCOD	被解释变量	lnNH ₃ -N	被解释变量	lnCOD	被解释变量	lnNH ₃ -N	被解释变量	lnCOD	被解释变量	lnNH ₃ -N
constant	7.687***	9.582	3.776***	6.661	3.822*	1.579	0.697	0.367	1.247	0.592	-1.079	-0.608
lnEA	-0.252***	-2.865	-0.008	-0.132	-0.679***	-4.560	-0.226*	-1.935	-0.546**	-2.445	-0.237	-1.261
lnPGDP	0.337***	3.749	-0.056	-0.874	0.671***	3.405	0.063	0.408	0.620**	1.800	0.184	0.632
lnIS	-0.146	-0.901	-0.019	-0.166	0.185	0.608	0.299	1.249	-0.090	-0.318	0.232	0.971
lnTP	0.768***	14.022	0.826***	21.343	1.144***	4.880	1.099***	5.973	1.566***	10.859	1.249***	10.260
lnUR	-0.351**	-2.461	0.253***	2.511	0.039	0.132	0.593**	2.545	0.293	0.753	0.664***	2.025
P值	0.000		0.000		0.000		0.000		0.000		0.000	
F值	51.472		119.368		8.911		10.216		30.861		31.733	
调整后R ²	0.540		0.734		0.348		0.384		0.772		0.777	
D.W值	1.836		1.980		2.380		2.234		1.798		2.026	

总体样本模型中,当第二产业比例、年末常住人口规模每增加1个百分点,将引起化学需氧量排放量0.306%和1.062%的增长,或引起氨氮排放量0.423%和1.043%的相应增长,表明当前工业化的高污染高排放模式仍未扭转,而人口规模增加也显著提高排放强度。城镇化水平对化学需氧量排放的影响不显著,但对氨氮排放具有正向影响,城镇化水平每增加1个百分点,总体、沿海及内陆地区样本的氨氮排放将依次提高0.653%、0.322%和0.5613%,表明氨氮排放以城镇生活源为主,在快速城镇化背景下,需重点加强城镇氨氮污水处理设施及管网建设,以此应对城镇化过程引起的氨氮污染效应。

此外,经济发展水平对全国水污染排放的影响效应为正向,人均GDP每增加1个百分点,化学需氧量排放将提高0.283%,表明经济发展水平对水污染物排放的驱动作用仍存在,且在内陆地区这种驱动更为突出。只有在沿海地区其对氨氮排放的影响效应为负,其弹性系数为-0.223%,经济发展水平对沿海地区氨氮排放的抑制作用已经显现。进一步统计显示,沿海地区城市的人均GDP(5.77万元)高于全国平均水平(4.19万元),也显著高于内陆地区(3.51万元)。根据环境库兹涅茨曲线规律,与内陆不同,人均GDP较高的沿海地区已进入倒“U”形曲线的后端,水污染排放受经济发展抑制阶段的出现,可能得益于随着经济发展水平提升而污染型产业转型与淘汰,以及环境规制诉求、环保技术和工艺投入的加强。

2.1.2 不同规模城镇影响程度的差异性分析

如表2所示,三类城市样本回归的 P 值均小于0.01的显著性水平, $D.W$ 值在1.2~1.8之间,说明估计模型通过了显著性分析、不存在异方差性,调整后 R^2 也显示了较高的拟合程度。对于被解释变量为 $\ln\text{COD}$ 的参数估计,其弹性系数在大城市及特大城市、中等城市、小城市样本分别为-0.252、-0.679、-0.546;对于被解释变量为 $\ln\text{NH}_3\text{-N}$ 的参数估计,弹性系数在中等城市为-0.226,而在其他两类城市未通过显著性检验。可见,在中小城市,经济集聚对水污染物排放的抑制作用不仅高于大城市及特大城市、也高于总体样本的估计系数。也就是说,经济集聚减排效应在中小城市更加显著,其原因可能在于:在一定城镇规模限度内,产业趋向集聚发展,则资金投入、生产技术、减排工艺等的外部溢出效应趋强,由此对区域水减排产生积极影响。但随着城镇规模的大幅提升,产业集聚及人口规模扩张的负外部性不断累积并逐步放大,导致产业布局的环境负荷加重。模型估计结果也印证了这一结论,即大城市经济集聚的减排效应均小于中小城市,而对氨氮排放而言,经济集聚未必能减轻水污染程度,若盲目扩大城市规模,甚至会出现集聚驱动污染排放的状况。

此外,由于城镇规模差异,其他控制变量的解释力和显著性存在较大差异,主要表现在:对于化学需氧量排放而言,经济发展水平和人口规模因素在三类城市都有一定的驱动效应,且在中等城市和小城市的驱动程度较大城市更为突出,当人均GDP、年末常住人口规模每增加1个百分点,将引起中等城市化学需氧量排放量0.671%、1.144%的相应增长,亦或引起小城市排放量0.620%、1.566%的增长;城镇化水平仅在大城市及特大城市样本中呈现负向影响(弹性系数为-0.351)。对于氨氮排放而言,人口规模和城镇化水平均显著驱动了氨氮排放,二者均通过显著性检验并呈正向影响,对比驱动程度亦发现,中小城市相比大城市及特大城市更加突出,如当城镇化率每增加1个百分点,将依次引起小城市、中等城市、大城市及特大城市氨氮排放量0.253%、0.593%、0.664%的相

应增长。可见，城镇化水平由于城镇规模差异呈现不同影响效应，在中小城市显著驱动化学需氧量排放增长，而在大城市及特大城市呈现了较强的抑制作用，表明在中小城市解决城镇化过程中的水污染效应是降低排放强度的重要方面。

2.2 经济集聚对区域水污染物排放的溢出效应

2.2.1 全局空间自相关特征

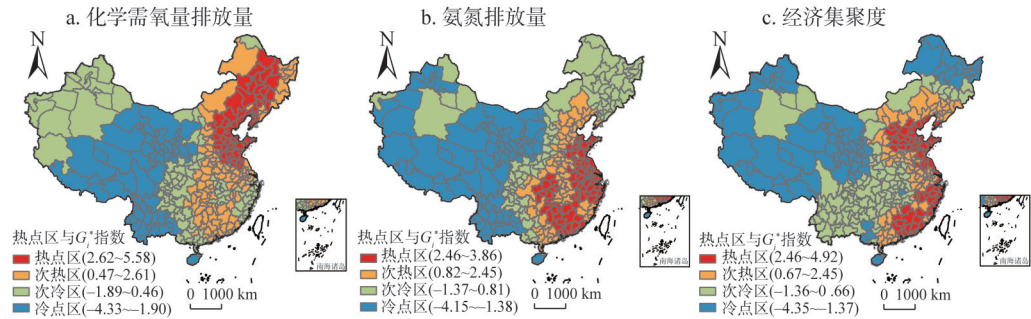
单变量和双变量空间自相关的评估如表3所示，地级城市单元化学需氧量和氨氮排放量的Moran's *I*指数均为正，并通过显著性水平检验。化学需氧量和氨氮排放量的Moran's *I*分别为0.2575、0.2542，说明全国水污染物排放空间上呈现出显著的空间关联。进一步计算Getis-Ord G_i^* 指数，再将 G_i^* 指数依次划分为热点区、次热区、次冷区和冷点区4种类型，并生成局部空间关联变化图（图1），发现化学需氧量排放、氨氮排放和经济集聚度的高值簇和低值簇集聚现象十分显著。其中，19个地级城市单元是化学需氧量和氨氮排放热区的重叠区域，位于山东省全域以及苏北地区的徐州、连云港、淮安、宿迁等。

表3 水污染物排放的空间自相关分析结果

Table 3 Moran's *I* of single and bivariate spatial correlation for water pollutant emissions

污染物		单变量	双变量	
			与经济集聚度	与经济发展水平
COD	Moran's <i>I</i>	0.2575	0.2025	0.1469
	<i>P</i> 值	0.0010	0.0100	0.0010
NH ₃ -N	Moran's <i>I</i>	0.2542	0.2737	0.1188
	<i>P</i> 值	0.0010	0.0100	0.0030

将化学需氧量和氨氮排放量设为中心变量、经济集聚度设为周围变量的评估表明，双变量Moran's *I*指数分别为0.2025、0.2737，均通过显著性检验，表明经济集聚同水污染物排放之间均存在不同程度的空间关联，且都为空间正相关，即经济集聚规模越高、水污染物的区域性高强度排放格局越突出。此外，经济集聚与氨氮排放量的Moran's *I*指数较大，两者空间关联性较化学需氧量排放更强，意味着氨氮高强度排放区更倾向于分布在经济集聚水平较高的区域。对经济发展水平同污染物排放的双变量Moran's *I*指数分析则表明，经济集聚度对水污染物排放的溢出效应强于经济发展水平因素。



注：本图基于国家测绘地理信息局标准地图服务网站下载的审图号为GS(2016)1595的标准地图制作，底图无修改，下同。

图1 化学需氧量和氨氮排放量、经济集聚度的热区分布

Fig. 1 Hotspots map of COD and NH₃-N emissions and economic agglomeration

2.2.2 局部空间自相关格局

在 z 检验基础上($P=0.05$)测算形成双变量的局部LISA集聚图(图2),用于识别经济集聚同水污染物排放的空间关联模式,即高集聚—高排放(High-High)、低集聚—低排放(Low-Low)、低集聚-高排放(Low-High)、高集聚—低排放(High-Low),以及无显著空间相关性(Not sig.)的随机模式。

(1) 高集聚—高排放区:指经济集聚水平较高,水污染物排放强度也较高的区域。经济集聚同化学需氧量排放的高集聚—高排放区主要分布在华北和东北地区,从京津冀向山东半岛绵延分布,以及长春、吉林、哈尔滨、大庆、松原等哈长城市群地区(图2a),还零星分布于鞍山、辽阳、益阳等,合计24个地级城市单元;经济集聚同氨氮排放的高集聚—高排放区分布在鲁西南、苏北和苏中、长株潭、福建和珠三角以及京津等地区(图2b),合计28个地级城市单元。该类地区经济集聚水平高、产业开发密度大。与此同时,大规模地经济集聚过程导致其规模污染效应增强,水环境污染加重。其中,北京、天津、徐州、枣庄、济宁、日照、临沂及益阳是两种水污染物高集聚—高排放区的叠加区域,表明控制经济集聚规模、并形成环境友好型产业结构对改善京冀、鲁西南等区域性水污染的重要性。

(2) 低集聚—低排放区:指经济集聚水平较低,水污染物排放强度也较低的区域。经济集聚同化学需氧量和氨氮排放的低集聚—低排放区覆盖面广且重合度高,集中分布在青藏高原区及边缘地带,包括西藏、青海、新疆、甘肃、宁夏以及内蒙古西部、滇西北和川西地区的地级城市单元。该类地区主要位于“胡焕庸线”西北半壁,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,水污染物排放强度大幅度降低(图3),平均化学需氧量和氨氮排放量分别为2.35万t、0.22万t,仅是高集聚—高排放区平均排放量的1/5和1/6。一般该类地区只需注意对城镇人口和企业个体排放强度管控,即可满足区域水污染物排放的总量控制要求。

(3) 低集聚—高排放区:指经济集聚水平较低,但水污染物排放强度比较高的区域。其中,经济集聚同化学需氧量排放的低集聚—高排放区分布在东北、华北地区高集聚—高排放区外围的14个地级城市单元;经济集聚同氨氮排放的低集聚—高排放区包括位于高集聚—高排放区外围的连云港、荆州、咸宁、邵阳、韶关、惠州等,以及衡水、

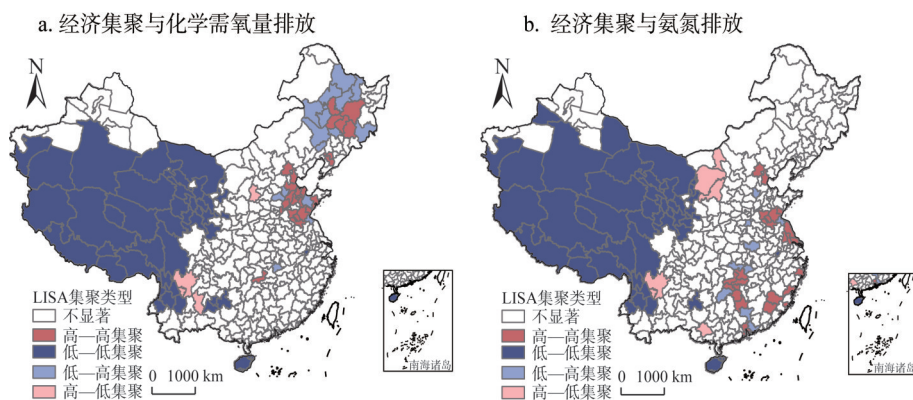


图2 经济集聚度与水污染物排放量的双变量LISA集聚图

Fig. 2 Bivariate LISA cluster maps of water pollutant emissions

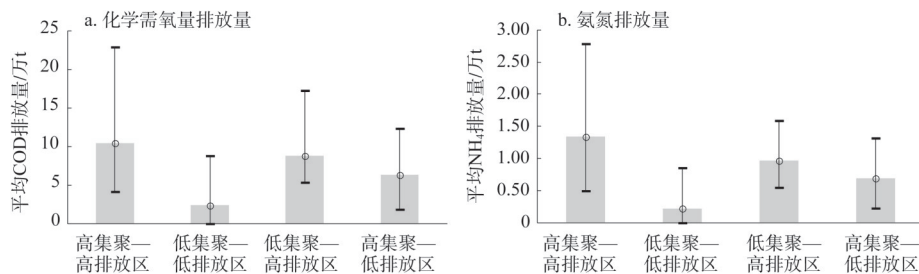


图3 不同溢出效应下的水污染物排放量

Fig. 3 Water pollutant emissions among different spillover effects

开封、信阳三市。该类地区尽管经济集聚规模不大，但由于畜禽养殖业、水产养殖业和种植业产生等农业生产比例高，农业源污染物排放强度大。低集聚—高排放区内化学需氧量和氨氮的农业源排放比例分别为68.15%、40.04%，显著高于其他类型40.83%、25.34%的平均比例。可见，在低集聚—高排放区应推进农业绿色发展，提高农业水资源利用效率，注重农药和化肥减量控害，通过绿色防控减轻农业面源污染。此外，由于该地区还临近城镇规模高的城市化地区，受到相邻高排放区的溢出效应影响，水污染物排放强度提升速度较快。其中，两种水污染物低集聚—高排放区的叠加区域包括衡水、连云港和咸宁。

(4) 高集聚—低排放区：指经济集聚水平较高，水污染物排放强度比较低的区域。经济规模同化学需氧量和氨氮排放的高集聚—低排放区均分布较少，前者包括吕梁、攀枝花、凉山和曲靖，后者主要包括包头、鄂尔多斯和榆林以及攀枝花、凉山、南宁。相比于高集聚—高排放区，该地区的水环境污染强度并不高，但随着产业集中度进一步提升，将可能是未来水污染物排放的高速增长区域。

3 结论与讨论

(1) 影响因素估计表明，经济集聚能有效降低区域水污染排放强度，经济集聚水平在全国总体样本以及沿海地区、内陆地区样本的模型估计中均为负值，总体样本中经济集聚度每增长1个百分点，化学需氧量和氨氮排放将分别减少0.491%和0.166%，说明经济集聚形成了污染减排效应，经济活动趋向集聚发展，则资金投入、生产技术、减排工艺等的外部溢出效应趋强，由此提高区域资源及能源利用效率，并对水环境产生积极影响。此外，工业化程度、人口规模和城镇化水平等因素对水污染排放呈正向驱动，体现了当前工业化进程与高排放高污染的耦合模式仍未扭转，人口规模提升和城镇化进程显著提高了水污染排放强度。

(2) 与大城市及特大城市相比，经济集聚对中小城市水污染排放的减排效应更为突出。随着城镇规模大幅提升，经济集聚及人口规模扩张的负外部性不断累积放大，由此导致产业布局的环境负荷加重。在中小城市显著驱动化学需氧量排放，而在大城市及特大城市具有较强的抑制作用，表明在中小城市解决化学需氧量与城镇化的伴生效应是降低排放强度的重要方面。可见，在工业化和城镇化战略制定时，应制定差异化政策工具引导产业集聚过程，一方面，积极培育中小城市，发挥其经济集聚的减排效应，通过规模报酬、技术外溢等引导生产要素和经济活动在空间集中，提高能源利用效率和环保投

入;另一方面,合理控制大城市经济与人口规模,加快产业结构调整 and 落后产能淘汰,联合防止“污染避难所”效应,严控超标准和超总量排污,切实降低区域性水环境污染。

(3) 经济集聚同水污染物排放间均存在不同程度的空间关联,经济集聚度越高,水污染物的区域性高强度排放格局越突出,经济集聚度同化学需氧量和氨氮排放量的双变量 Moran's I 指数分别为 0.2025、0.2737,均通过了显著性检验并呈正相关,且氨氮高强度排放区更倾向于分布在经济集聚水平较高的区域。LISA 集聚也表明,经济集聚同水污染物排放的空间溢出效应显著,且二者呈现了高集聚—高排放、低集聚—低排放、低集聚—高排放等空间关联模式。其中,高集聚—高排放区从京津冀向山东半岛绵延分布,还包括哈长城市群、苏北和苏中、长株潭、珠三角等地区,且京冀、鲁西南地区两种污染物高集聚—高排放区的叠加区域;低集聚—低排放区集中分布在青藏高原区及边缘地带;低集聚—高排放区分布在东北、华北地区的高集聚—高排放区外围,由于农业源水污染物排放强度大,导致该地区经济集聚与水环境污染的失衡。未来,需要加强跨行政区环境保护与治理合作,重点推进高集聚—高排放区、低集聚—高排放区的联防联控和流域共治,针对不同水体污染物分别设立联防联控单元,最大程度遏止经济集聚与水环境污染的空间溢出效应。

(4) 本文重点探讨了经济集聚对水污染物排放的影响,及其在不同规模城镇影响程度的差异性,分析了经济集聚同水污染物排放的溢出效应。还需在未来深化研究的方面包括:对不同强度的经济集聚出现污染减排效应的临界阈值做深入研究;加强污染排放对经济集聚过程的反馈机制研究;对各类水污染物的环境属性及共轭作用进行深入研究,为解决水环境容量评估中各类污染权重厘定和集成方法提供参考。

参考文献(References):

- [1] 王强,刘雅玲,吴悦颖,等.我国主要污染物排放强度区域特征分析研究.环境保护科学,2015,41(3): 57-61. [WANG Q, LIU Y L, WU Y Y, et al. Analysis of spatial characteristics of emission intensity of the main pollutants in China. Environmental Protection Science, 2015, 41(3): 57-61.]
- [2] 马树才,李国柱.中国经济增长与环境污染关系的Kuznets曲线.统计研究,2006,23(8): 37-40. [MA S C, LI G Z. The Kuznets Curve of relation between Chinese economic growth and environmental pollution. Statistical Research, 2006, 23(8): 37-40.]
- [3] 陈祖海,雷朱家华.中国环境污染变动的时空特征及其经济驱动因素.地理研究,2015,34(11): 2165-2178. [CHEN Z H, LEIZHU J H. The spatial-temporal characteristics and economic drivers of environmental pollution changes in China. Geographical Research, 2015, 34(11): 2165-2178.]
- [4] 陆大道.中速增长:中国经济的可持续发展.地理科学,2015,35(10): 1207-1219. [LU D D. Moderate-speed growth: Sustainable development of China's economy. Scientia Geographica Sinica, 2015, 35(10): 1207-1219.]
- [5] 崔学刚,方创琳,张蕾.京津冀城市群环境规制强度与城镇化质量的协调性分析.自然资源学报,2018,33(4): 563-575. [CUI X G, FANG C L, ZHANG Q. Coordination between environmental regulation intensity and urbanization quality: Case study of Beijing-Tianjin-Hebei Urban Agglomeration. Journal of Natural Resources, 2018, 33(4): 563-575.]
- [6] GROSSMAN G. KUERGER A. Economic, growth and the environment. Quarterly Journal of Economics, 1995, 110(2): 353-377.
- [7] SELDEN T M, SONG D S. Environmental quality and development: Is there a Kuznets Curve for air pollution emissions. Journal of Environmental Economics and Management, 1994, 27(2): 147-162.
- [8] 俞树毅,高峰,张燕.经济增长、投资结构与环境效应:基于我国三大经济区的实证研究.华东经济管理,2013,27(6): 70-77. [YU S Y, GAO F, ZHANG Y. Economic growth, investment structure and environmental effect: Empirical study on the three economic regions in China. East China Economic Management, 2013, 27(6): 70-77.]

- [9] 赵红, 彭磐. 对外贸易, 相对收入与污染物排放: 基于我国省级单位面板数据的研究. 南京农业大学学报: 社会科学版, 2013, 13(1): 103-105. [ZHAO H, PENG X. Trade, relative income and emissions of the pollutants: A study based on panel data from provincial level units. Journal of Nanjing Agricultural University: Social Sciences Edition, 2013, 13(1): 103-105.]
- [10] HOSSEIN H M, KANEKO S. Can environment quality spread through institutions?. *Energy Policy*, 2013, 56(2): 312-321.
- [11] FRANK A, MOUSSIOPOULOS N, BARTONOVAC A, et al. Urban air quality in larger conurbations in the European Union. *Environmental Modelling & Software*, 2001, 16(4): 399-414.
- [12] 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. 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. *Ecological Economy*, 2015, 31(5): 160-165.]
- [13] ZHAO X F, DENG C L, HUANG X J, et al. Driving forces and the spatial patterns of industrial sulfur dioxide discharge in China. *Science of the Total Environment*, 2017, 577: 279-288.
- [14] NIJKAMP P, VERHOEF E T. Urban environmental externalities, agglomeration forces, and the technological "deus ex machina". *Environment & Planning A*, 2008, 40(4): 928-947.
- [15] THISSE J F. Human capital and agglomeration economies in urban development. *The Developing Economies*, 2018, 56(2): 117-139.
- [16] LIU G Y, YANG Z F, TANG Y C, et al. Spatial correlation model of economy-energy-pollution interactions: The role of river water as a link between production sites and urban areas. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 2017, 69: 1018-1028.
- [17] 于峰, 齐建国. 开放经济下环境污染的分解分析: 基于1990-2003年间我国各省市的面板数据. 统计研究, 2007, 24(1): 47-53. [YU F, QI J G. Decomposing and analyzing the environmental pollution under the opening economic circumstances: Based on the panel data of provinces, autonomous regions and municipals of China from 1990 to 2003. *Statistical Research*, 2007, 24(1): 47-53.]
- [18] 刘满凤, 谢哈进. 中国省域经济集聚性与污染集聚性趋同研究. 经济地理, 2014, 34(4): 25-32. [LIU M F, XIE H J. The convergence research of economy aggregation and pollution aggregation among China's provinces. *Economic Geography*, 2014, 34(4): 25-32.]
- [19] FRANK A. Urban air quality in larger conurbations in the European Union. *Environmental Modeling and Software*, 2011, 16(4): 399-414.
- [20] VERHOEF E T, NIJKAMP P. Externalities in urban sustainability: Environmental versus localization-type agglomeration externalities in a general spatial equilibrium model of a single-sector monocentric industrial city. *Ecological Economics*, 2002, 40(2): 157-179.
- [21] 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. 地理研究, 2011, 30(5): 902-912. [GAO S, WEI Y H, CHEN W, et al. Study on spatial-correlation between water pollution and industrial agglomeration in the developed region of China: A case study of Wuxi city. *Geographical Research*, 2011, 30(5): 902-912.]
- [22] HOSOE M, NAITO T. Trans-boundary pollution transmission and regional agglomeration effects. *Papers in Regional Science*, 2006, 85(1): 99-120.
- [23] 闫逢柱, 苏李, 乔娟. 产业集聚发展与环境污染关系的考察: 来自中国制造业的证据. 科学学研究, 2011, 29(1): 79-83. [YAN F Z, SU L, QIAO J. The exploration of the relationship between the industrial agglomeration's developments and the environmental pollution: The evidence from the manufacturing in China. *Studies in Science of Science*, 2011, 29(1): 79-83.]
- [24] GUO J, XU Y, PU Z. Urbanization and its effects on industrial pollutant emissions: An empirical study of a Chinese case with the spatial panel model. *Sustainability*, 2016, 8(8): 812.
- [25] WANG Z, JIA H F, XU T, et al. Manufacturing industrial structure and pollutant emission: An empirical study of China. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 197(1): 462-471.
- [26] 王晓硕, 宇超逸. 空间集聚对中国工业污染排放强度的影响. 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. *China Environmental Sci-*

- ence, 2017, 37(4): 1562-1570.]
- [27] 张可. 空间视角下经济集聚的减排效应研究. 华中科技大学学报: 社会科学版, 2017, 31(3): 86-97. [ZHANG K. The reduction emissions effect of agglomeration based on spatial perspectives. Journal of Huazhong University of Science and Technology: Social Science Edition, 2017, 31(3): 86-97.]
- [28] 徐成龙, 程钰. 新常态下山东省环境规制对工业结构调整及其大气环境效应研究. 自然资源学报, 2016, 31(10): 1662-1674. [XU C L, CHENG Y. The action of environmental regulation on industrial structure adjustment and atmospheric environment effect under the new normal in Shandong province. Journal of Natural Resources, 2016, 31(10): 1662-1674.]
- [29] 邓玉萍, 许和连. 外商直接投资、集聚外部性与环境污染. 统计研究, 2016, 33(9): 47-54. [DENG Y P, XU H L. Foreign direct investment, agglomeration externalities and environmental pollution. Statistical Research, 2016, 33(9): 47-54.]
- [30] FERARD J F, BLAISE C. Encyclopedia of Aquatic Ecotoxicology. Dordrecht: Springer Science, 2013.
- [31] SCHOLTEN M C T, FOEKEMA E M, DOKKUM H P V, et al. Eutrophication Management and Ecotoxicology. Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2005.
- [32] 陆大道, 姚士谋. 中国城镇化进程的科学思辨. 人文地理, 2007, 22(4): 1-5. [LU D D, YAO S M. A scientific thought about urbanization progress in China. Human Geography, 2007, 22(4): 1-5.]
- [33] CICCONE A, HALL R E. Productivity and the density of economic activity. The American Economic Review, 1996, 86(1): 54-70.
- [34] 刘习平, 宋德勇. 城市产业集聚对城市环境的影响. 城市问题, 2013, (3): 9-15. [LIU X P, SONG D Y. The influence of urban industrial agglomeration on urban environment. Urban Problems, 2013, (3): 9-15.]
- [35] 张翠菊, 张宗益. 产业和人口的空间集聚对中国区域碳排放强度的影响. 技术经济, 2016, 35(1): 71-77, 125. [ZHANG C J, ZHANG Z Y. Effect of spatial agglomeration of industry and population on China's regional carbon emission intensity. Technology Economics, 2016, 35(1): 71-77, 125.]
- [36] USHIFUSA Y, TOMOHARA A. Productivity and labor density: Agglomeration effects over time. Atlantic Economic Journal, 2013, 41(2): 123-132.
- [37] DIETZ T, ROSA E. Effects of population and affluence on CO₂ emissions. PNAS, 1997, 94(1): 175-179.
- [38] EHRLICH P, HOLDREN J. The impact of population growth. Science, 1974, 171(3977): 1212-1217.
- [39] 李勇刚, 张鹏. 产业集聚加剧了中国的环境污染吗: 来自中国省级层面的经验证据. 华中科技大学学报: 社会科学版, 2013, (5): 97-106. [LI Y G, ZHANG P. Have industrial agglomeration aggravated regional environmental pollution: Chinese provincial level empirical evidence. Journal of Huazhong University of Science and Technology: Social Science Edition, 2013, (5): 97-106.]
- [40] 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. 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. Environmental Science, 2009, 30(6): 1580-1587.]
- [41] 程钰, 任建兰, 陈延斌, 等. 中国环境规制效率空间格局动态演变及其驱动机制. 地理研究, 2016, 35(1): 123-136. [CHENG Y, REN J L, CHEN Y B, et al. Spatial evolution and driving mechanism of China's environmental regulation efficiency. Geographical Research, 2016, 35(1): 123-136.]
- [42] 戚伟, 刘盛和, 金浩然. 中国城市规模划分新标准的适用性研究. 地理科学进展, 2016, 35(1): 47-56. [QI W, LIU S H, JIN H R. Applicability of the new standard of city-size classification in China. Progress in Geography, 2016, 35(1): 47-56.]
- [43] 国务院. 关于调整城市规模划分标准的通知. http://www.gov.cn/zhengce/content/2014-11/20/content_9225.htm. 2014-10-29. [The State Council of the People's Republic of China. Notice on adjusting the city size classification criteria. http://www.gov.cn/zhengce/content/2014-11/20/content_9225.htm, 2014-10-29.]

Impact of economic agglomeration on regional water pollutant emissions and its spillover effects

ZHOU Kan^{1,2}, WANG Qiang³, FAN Jie^{1,2}

(1. Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China;

2. Key Laboratory of Regional Sustainable Development Modeling, CAS, Beijing 100101, China;

3. School of Geographical Sciences, Fujian Normal University, Fuzhou 350007, China)

Abstract: Based on the database of COD and NH₃-N emissions from 339 cities at prefecture level in China, this paper explores the impact of economic agglomeration on regional water pollutant emissions and the differences in the impact levels between different city-size by using the econometric model. Meanwhile, a bivariate spatial autocorrelation method is adopted to analyze the spillover effect of economic agglomeration on water pollutant emissions, which provides a reference for making a benign interactive countermeasure to promote economic agglomeration and pollution mitigation. The results show that: according to the whole sample, economic agglomeration can effectively reduce the intensity of the regional water pollutant emissions. The degree of economic agglomeration increases by 1%, and the COD and NH₃-N emissions will decrease by 0.491% and 0.166% respectively. Compared with the large cities and mega-cities, economic agglomerations have more prominent reduction effects on water pollutant in small and medium-sized cities. Economic agglomeration and water pollutant discharge have shown significant spatial spillover effects, and present spatial agglomeration patterns of high agglomeration-high emission, low agglomeration-low emission, and low agglomeration-high emission. High agglomeration-high emission areas are located from Beijing-Tianjin-Hebei region to the Shandong Peninsula, as well as other highly urbanized area such as Harbin-Changchun, the Yangtze River Delta, the Pearl River Delta and Changsha-Zhuzhou-Xiangtan. Policy implications and suggestions include: actively nurturing small and medium-sized cities, exerting significant reduction effects of economic agglomeration, promoting technological upgrade and diffusion of production technologies, improving energy efficiency and environmental protection input; rationally controlling the economic and population size of large cities and mega-cities, improving environmental regulations to prevent "Pollution Haven" effects, and accelerating industrial restructuring and outdated production capacity to eliminate and strictly control over-standard and over-total emissions; reducing the negative externalities of economic agglomeration, with a focus on promoting joint prevention and basin governance of high agglomeration-high emission area.

Keywords: economic agglomeration; city-size; water pollutant emissions; pollution reduction effect; spillover effect