

环渤海地区水污染物排放的时空格局及其驱动因素

周侃^{1,2}, 樊杰^{1,2}, 刘汉初^{1,2}

(1. 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. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101)

摘要:本文基于地级行政单元的水污染物排放和社会经济截面数据,分析环渤海地区水污染物排放的流域特征与时空分异,定量解析环渤海地区及高强度排放聚集区内水污染物排放的驱动因素。研究结果表明:①海河流域是环渤海地区纳污量最大、增量最突出的流域,其化学需氧量和氨氮排放分别占区域排放总量的38.94%、39.23%。②2005年以来,环渤海地区水污染物高排放区从零星分布向连片分布转变,京津冀、山东半岛、辽中南已成为水污染物高排放区的叠加区域。③环渤海地区水污染物排放具有显著空间溢出效应,且空间关联程度呈增大趋势,水污染排放热度呈沿海向内陆递减态势,海河流域热度显著高于其他流域,沿海合作区显著高于内陆协作区;京津冀长期处于热点区和次热区,热区覆盖范围由海河向淮河流域拓展。④不同水污染物排放的驱动因素差异显著,对化学需氧量排放而言,经济增长速度、固定资产投资因素呈较强的正向带动,而城镇化水平和工业化程度表现出显著负向影响;对氨氮排放来说,人口规模呈正向带动,固定资产投资和外商直接投资亦有一定正向影响,经济发展水平则呈现显著的抑制作用。

关键词:水污染物排放;时空格局;空间关联;驱动因素;环渤海地区

1 引言

近年来,环渤海地区水污染物加速排放,水环境承载能力已达到或者接近上限,水污染问题严重制约了人居环境质量提升,甚至已威胁到国民的身体健康与生命安全(徐胜等, 2011; 王强等, 2015)。消减环渤海地区的主要水污染物排放量显得重要而紧迫,是关系到区域水环境综合治理的关键环节(陆大道, 2015; 项尧尧, 2015)。2015年,国务院批准发布的《环渤海地区合作发展纲要》将合力整治环境作为重点内容,提出协同推进河湖及海域污染防治,强化污染源监督管理,到2020年化学需氧量削减幅度达到或高于全国总体减排目标要求(国家发展改革委, 2015)。

水污染物消减与防治的前提是充分认知其排放格局及驱动因素。国内外研究表明,水污染排放存在显著的空间溢出效应(高爽等, 2011; 赵小凤等, 2009; 周侃, 2016),并发现水污染排放与人口分布、工业生产同向集聚导致污染加剧(Hosseini et al, 2013; 刘满凤等, 2014; 徐林清等, 2015),证实了开展跨区域水污染联合治理的必要性,并由此延伸出相应的政策与措施研究(王书明等, 2015)。在水污染排放的驱动因素解析方面,已有研究从单一因素向社会经济诸多因素拓展,早期主要关注收入水平与污染排放的倒“U”形曲线关系(Grossman et al, 1995),而后水污染物排放与经济发展关系、以及工业化和城镇化过程的污染物排放响应成为研究热点。研究表明中国经济增长与水污染仍处于同步

收稿日期:2016-08;修订日期:2017-01。

基金项目:国家自然科学基金项目(41501139, 41530634);中国科学院科技服务网络计划项目(KFJ-STZ-ZDTP-021) [Foundation: National Nature Sciences Foundation of China, No.41501139, No.41530634; Science and Technology Service Network Initiative of the Chinese Academy of Sciences, No. KFJ-STZ-ZDTP-021]

作者简介:周侃(1986-),男,助研,博士,研究方向为资源环境承载能力与区域可持续发展,E-mail: zhoukan2008@126.com。

引用格式:周侃,樊杰,刘汉初. 2017. 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, 36(2): 171-181. [Zhou K, Fan J, Liu H C. 2017. Spatiotemporal patterns and driving forces of water pollutant discharge in the Bohai Rim Region[J]. Progress in Geography, 36(2): 171-181.]. DOI: 10.18306/dlkxjz.2017.02.004

上升阶段(马树才等, 2006; 牛海鹏等, 2012; 赵红等, 2013), 并定量测度了人口数量、工业化程度、富裕程度、产业转移、境外投资等因素对污染排放的直接影响(蒋伟等, 2009; 唐德才, 2009; 陈媛媛等, 2010)。环渤海地区的实证研究中, 主要从省级层面进行水污染物排放格局分析(吴凯, 1997; 纪建悦等, 2012; 郭卫华等, 2015), 而对其驱动因素的研究多集中在经济增长要素方面(孙才志等, 2013; 朱悦, 2013)。由此不难看出, 为满足对环渤海地区水污染联防联控需求, 应加强区域污染物排放的空间效应研究, 并提升空间格局分析精度, 还需对导致高排放强度的驱动机制进行更全面地分析。因此, 本文基于地级行政单元的水污染物排放和社会经济截面数据, 选取化学需氧量、氨氮2项主要水污染物排放指标, 通过2005、2012年污染物排放量时空对比, 分析水污染物排放的流域特征与空间分异, 在此基础上构建影响因素计量模型, 定量解析环渤海地区及高强度排放聚集区域的人文驱动因素, 期为制定水污染物消减与防治相关政策提供参考。

2 研究区概况

环渤海地区位于中国华北、东北、西北三大区域结合部, 涵盖了海河和辽河流域以及部分淮河、黄河、松花江、内陆河流域, 由沿海合作区和内陆协作区组成, 前者包括北京市、天津市、河北省、辽宁省和山东省, 后者包括山西省和内蒙古自治区(国家发展改革委, 2015)。环渤海地区2014年末常住人口3.14亿, 地区生产总值18.5万亿元, 分别占全国的23%和27%, 为中国人口与产业密集区, 在全国社会与经济格局中占据重要地位。同时, 该区域也是全国水环境问题最显著的区域(夏军, 2002; 周侃等, 2016), 环渤海地区占全国国土面积的19.4%, 却承载了全国化学需氧量、氨氮排放总量的26.77%、21.72%。从排放强度来看, 环渤海地区水污染物排放强度一直高于全国平均水平并呈现快

速上升态势(表1)。2012年, 环渤海地市化学需氧量、氨氮的单位排放量为 $9.48 \times 10^4 \text{ t}$ 和 $0.81 \times 10^4 \text{ t}$, 分别高出全国单位排放量的35.43%、9.46%, 而与2005年相比, 环渤海地市的化学需氧量、氨氮排放强度分别增长了1.1倍和0.5倍。

3 数据与方法

3.1 数据来源与数据处理

本文构建了地市单元的水污染物排放及社会经济发展分析数据库, 环渤海地区地级及以上行政单元共67个, 包括北京、天津2个直辖市和65个地级市、州、盟。主要水污染物排放和社会经济数据主要来自《中国区域经济统计年鉴》《中国城市统计年鉴》《中国环境统计年鉴》以及《中国环境年鉴》等, 对其中统计数据不完整的空间单元, 进一步获取所在省份或地市单元统计年鉴补齐。在驱动因素分析数据集中, 除城镇化指标外, 其他被解释变量和解释变量指标均采用2012年数据。由于2012年地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, 本文采用2010年第六次全国人口普查中城镇人口占总人口的比重替代2012年的地市单元城镇化水平。1:400万省级和地级行政单元的边界数据等从国家基础地理信息系统网站获取。地市单元的流域属性根据中国水资源分区图中的一级区界确定。

3.2 研究方法

3.2.1 空间自相关分析

考虑到地市单元间水污染物排放的关联效应, 引入全局空间自相关Moran's I 指数测度空间邻近区域的总体相似程度和关联特征, 其计算公式为(赵小凤等, 2015):

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

式中: S^2 表示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($n=67$); Y_i 和 Y_j 分别为

表1 2005-2012年环渤海地区主要水污染物排放与全国对比

Tab.1 Comparison of water pollutant discharges between the Bohai Rim Region and nationwide in China, 2005-2012

指标项	地区	化学需氧量		氨氮	
		2005年	2012年	2005年	2012年
排放总量/ $\times 10^4 \text{ t}$	环渤海地区	302.15	635.30	36.98	54.23
	全国平均	1364.92	2372.81	145.45	249.73
单位排放量/ $\times 10^4 \text{ t}$	环渤海地区	4.51	9.48	0.55	0.81
	全国平均	4.03	7.00	0.43	0.74

i, j 地市单元的污染物排放量; w_{ij} 为基于空间邻接关系建立的权重矩阵; \bar{Y} 为污染物排放量的平均值。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。

采用局部空间自相关 Getis-Ord G^* 指数反映是否存在统计显著的高值簇(热区)与低值簇(冷区), 探索水污染物排放的空间集聚与分散格局, G^* 的计算公式为(程钰等, 2016):

$$G_i^* = \frac{\sum_{j=1}^n W_{ij}(d) Y_j}{\sum_{j=1}^n Y_j} \quad (2)$$

当 i 不等于 j 时, G_i^* 的标准表达形式为:
 $Z(G_i^*) = \frac{[G_i^* - E(G_i^*)]}{\sqrt{Var(G_i^*)}}$, 其中, $E(G_i^*)$ 和 $\sqrt{Var(G_i^*)}$ 分别为 G_i^* 的期望值和方差, W_{ij} 为空间权重矩阵, 采用邻近标准确定。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。

3.2.2 影响因素回归模型设定

借鉴既有研究的回归模型设定经验(Ehrlich et al, 1971; 牛海鹏等, 2012; 徐林清等, 2015), 兼顾地市单元数据可获得性, 选取主要水污染物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、经济增长速度、工业化程度、外商直接投资、固定资产投资的指标作为解释变量, 分析环渤海地区地市单元水污染物排放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:

$$\begin{aligned} \ln QPD_i = & \alpha + \beta_1 \ln TP_i + \gamma_1 \ln UR_i + \delta_1 \ln PGDP_i + \\ & \zeta_1 \ln GRGDP_i + \eta_1 \ln IS_i + \theta_1 \ln FDI_i + \\ & \mu_i \ln FAI_i + \varepsilon_i \end{aligned} \quad (3)$$

式中, QPD_i 代表化学需氧量或氨氮排放总量(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; $GRGDP_i$ 代表 GDP 增长率(%), 反映各地市单元的经济增长速度; IS_i 则代表第二增加值占 GDP 的比重(%), 反映产业结构与工业化程度; 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; $\beta_i, \gamma_i, \delta_i, \zeta_i, \eta_i, \theta_i, \mu_i$ 依次为各解释变量的回归系数; α 为常数项; ε_i 为随机误差项。

4 结果分析

4.1 环渤海地区水污染物排放的时空格局

4.1.1 水污染物排放的区域特征与变化

2012 年, 环渤海地区接纳水污染物排放量 $635.3 \times 10^4 \text{ t}$, 其中, 海河流域为环渤海纳污量最大的区域, 该流域化学需氧量和氨氮排放分别占环渤海排放总量的 38.94%、39.23%, 辽河、淮河流域纳污量次之, 分别约占排放总量的 2 成(表 2)。从排放量的增长速度看, 2005-2012 年间, 环渤海地区主要水污染物排放量增长迅速, 化学需氧量排放总量从 2005 年的 $302.15 \times 10^4 \text{ t}$ 增长至 $635.3 \times 10^4 \text{ t}$, 增幅达 1.1 倍, 而氨氮排放总量的增幅也达 46.65%。进一步对比显示, 在环渤海地区诸流域中, 主要汇入渤海的海河、辽河流域水污染物增量突出, 相比 2005 年, 2012 年两流域的化学需氧量分别增加了 $116.6 \times 10^4 \text{ t}$ 、 $84.76 \times 10^4 \text{ t}$ 。采用污染物排放贡献率(即区域污染物新增量/环渤海地区污染物总新增量 $\times 100\%$), 分析流域对整体水污染物排放增长的贡献程度, 测算结

表 2 2005-2012 年环渤海地区主要水污染物排放的流域对比
Tab.2 Comparison of water pollutant discharges in watersheds of the Bohai Rim Region, 2005-2012

流域	化学需氧量/ $\times 10^4 \text{ t}$			氨氮/ $\times 10^4 \text{ t}$		
	2005 年	2012 年	贡献率/%	2005 年	2012 年	贡献率/%
海河	130.79	247.39	35.00	14.05	21.27	41.87
辽河	68.07	152.83	25.44	9.76	12.24	14.41
淮河	43.21	112.94	20.93	4.96	11.07	35.47
黄河	50.72	87.78	11.12	6.87	8.14	7.39
松花江	5.50	21.08	4.68	0.70	0.97	1.53
内陆河	3.87	13.28	2.82	0.64	0.53	-0.66
环渤海地区	302.15	635.30	—	36.98	54.23	—

果表明,2005-2012年,仍然是海河和辽河流域对区域水污染物排放增长的贡献程度最大,化学需氧量新增排放的贡献率分别为35.00%和25.44%。不难看出,渤海属半封闭型内海,对水污染物的自净能力本就已经十分有限,而近年来不断增加的高强度、大体量陆源污染物入海过程,使得渤海海域的生态环境问题进一步恶化。

2005年来,沿海合作区的三省两市是环渤海地区水污染物排放的主要区域,其水污染物排放量占区域总量的比重均接近8成。在沿海合作区内,邻近渤海的17个地市水污染物排放强度略低于非邻海地市,2012年邻海地市的化学需氧量排放强度为 $10.93 \times 10^4 \text{ t}$,而非邻海地市排放强度为 $11.61 \times 10^4 \text{ t}$;在内陆协作区内,山西水污染物排放强度增长较为平稳,2005-2012年间,山西境内单位地市的化学需氧量排放强度从 $2.28 \times 10^4 \text{ t}$ 增长至 $2.80 \times 10^4 \text{ t}$,而内蒙古境内化学需氧量排放强度从 $1.10 \times 10^4 \text{ t}$ 增长至 $3.27 \times 10^4 \text{ t}$,污染物排放强度增长近2倍。2005-2012年,沿海合作区对环渤海地区水污染物排放增长的贡献程度最大,其化学需氧量和氨氮新增排放的贡献率分别为79.69%、90.14%。在内陆协作区,山西和内蒙古不同水污染物排放增长的贡献程度差异较大,内蒙古对化学需氧量排放增长的贡献率为86.70%,而山西对氨氮排放增长的贡献率为84.12%。由此可见,在继续加强邻海地区水污染排放控制的同时,对环渤海内陆腹地水污染物减排与管制仍需加强,需着重遏制内蒙古的化学需氧量以及山西的氨氮排放过快增长态势。

4.1.2 水污染物排放的分布格局与变化

将环渤海地区地市单元的化学需氧量排放量

按 $>8 \times 10^4 \text{ t}$ 、 $(6\sim8) \times 10^4 \text{ t}$ 、 $(4\sim6) \times 10^4 \text{ t}$ 、 $(2\sim4) \times 10^4 \text{ t}$ 和小于 $2 \times 10^4 \text{ t}$ 依次分为高、较高、中等、较低以及低5个等级,图1显示了2005年和2012年化学需氧量排放的空间分布格局与变化情况:①化学需氧量的高排放区从零星分布向连片分布格局转变,高排放区从2005年的8个地市增至2012年的35个地市,集中分布于京津冀、辽中南、山东半岛以及蒙东地区,高排放区面积达 $105.19 \times 10^4 \text{ km}^2$,占环渤海地区国土总面积的57.87%。②高排放和较高排放区的分布从主要河流的流域下游向中上游蔓延,2005年高排放和较高排放区主要位于海河流域局部区域,到2012年则东延西扩至海河、淮河、辽河以及内蒙古高原内陆河流域。总之,环渤海地区化学需氧量排放全面提升,特别是在东部人口稠密、经济发达的沿海合作区,区域水环境受有机物污染胁迫日趋严重,面临严峻水安全风险。

从氨氮排放量看,按 $>0.8 \times 10^4 \text{ t}$ 、 $(0.6\sim0.8) \times 10^4 \text{ t}$ 、 $(0.4\sim0.6) \times 10^4 \text{ t}$ 、 $(0.2\sim0.4) \times 10^4 \text{ t}$ 和 $<0.2 \times 10^4 \text{ t}$ 对氨氮排放等级进行由高到低5级划分,结果如图2所示。环渤海地区氨氮排放格局呈以下主要特征:①2005年,氨氮高排放区主要分布于京津冀地区中部的北京、天津、石家庄、保定和石家庄,辽中南地区的沈阳、本溪、大连和阜新以及内蒙古包头,且高排放区周边多属于较高排放区,呈圈层式格局,到2012年,高排放区地市数量从10个增至26个,高排放区面积为 $33.53 \times 10^4 \text{ km}^2$,占环渤海地区国土总面积的18.45%,京津冀中部、南部原较高排放区均转变为高排放区。②山东半岛氨氮排放等级提升突出,2005年境内无大于 $0.8 \times 10^4 \text{ t}$ 的地市单元,到2012年,除淄博、东营、威海等地市外,其余11个地

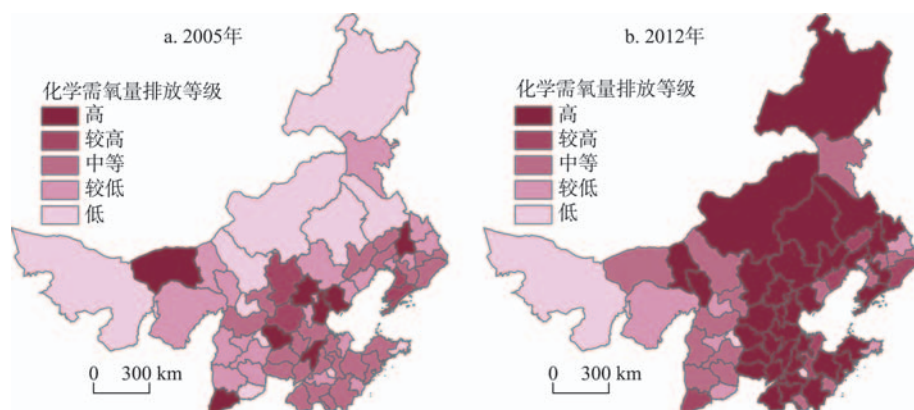


图1 2005-2012年环渤海地区化学需氧量排放格局

Fig.1 Spatial distribution of COD discharge in the Bohai Rim Region, 2005-2012

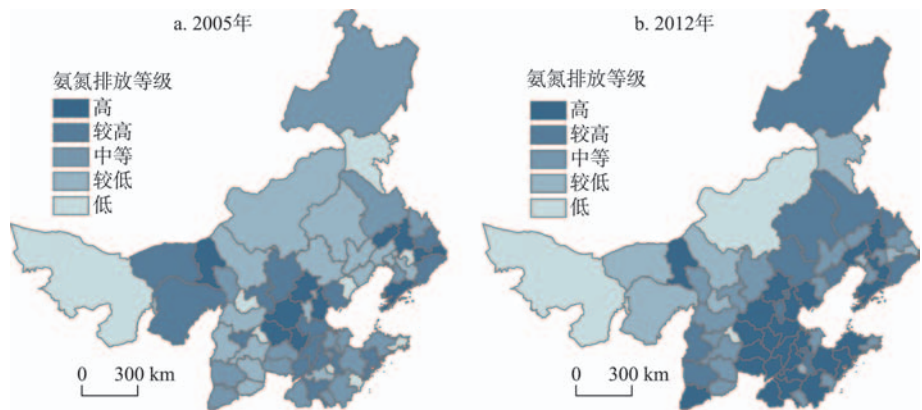


图2 2005-2012年环渤海地区氨氮排放格局

Fig.2 Spatial distribution of NH₃-N discharge in the Bohai Rim Region, 2005-2012

市均为氨氮高排放区。③蒙西地区氨氮排放压力有所缓解,境内鄂尔多斯、巴彦淖尔、乌海等地市的氨氮排放等级下降明显。

4.1.3 水污染物排放的空间关联与变化

利用 ArcGIS 10.2 的地统计模块对水污染物排放的 Global Moran's I 及相关指标进行测算。结果如表 3 所示,环渤海地区化学需氧量和氨氮排放量的 Moran's I 指数均为正,其正态统计量 Z 值均通过显著性检验。同时,2005-2012 年间,化学需氧量、氨氮排放量的 Moran's I 指数呈上升趋势,二者分别增加了 0.0186、0.0884,表明环渤海地区水污染物排

放存在空间正相关,具有显著空间溢出效应,且地市单元间的空间关联程度呈增大趋势。为进一步分析空间关联特征,分别计算 2005 年、2012 年地市单元主要水污染物排放的 Getis-Ord G^* 指数,再将 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,生成局部空间关联变化图。整体上看,环渤海地区水污染排放热度基本保持着从沿海向内陆递减的态势,沿海合作区热度显著高于内陆协作区,且海河流域长期处于热点区域。

从化学需氧量排放的热区变化来看(图 3),2005 年,处于热点区的地市均位于京津冀地区,包括北

表 3 环渤海地区主要水污染物排放的 Moran's I 估计值

Tab.3 Moran's I of water pollutant discharges					
指标项	年份	Moran's I	方差	$Z(I)$	P 值
化学需氧量	2005	0.149037	0.005675	2.179537	0.029292
	2012	0.167632	0.005992	2.361349	0.018209
氨氮	2005	0.111121	0.005730	1.668120	0.095292
	2012	0.199535	0.005872	2.801669	0.005084

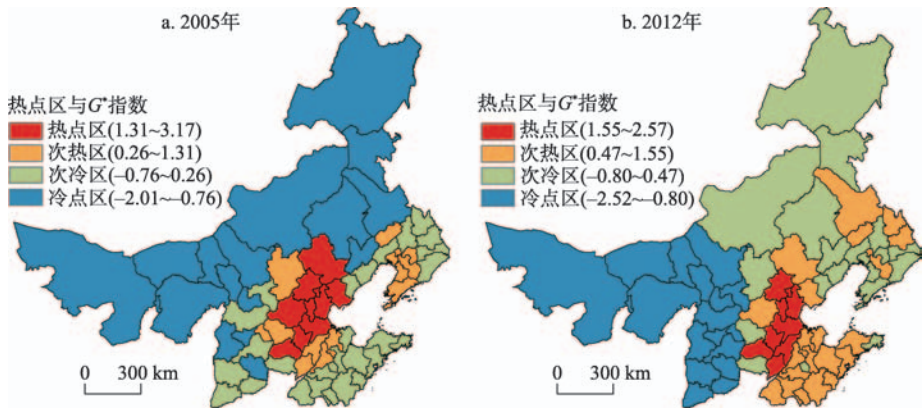


图3 2005-2012年环渤海地区化学需氧量排放的热区变化

Fig.3 Spatial change of hotspots of COD discharge in the Bohai Rim Region, 2005-2012

京、天津、保定、廊坊、承德、唐山、沧州、衡水、邯郸、邢台等,次热区域分布于京津冀外围和辽东半岛,次冷区分布于山东、辽北和山西,冷点区包括内蒙古全境。到2012年,热点区从2005年的9个减至8个,次热区从13个增至20个,承德、唐山和保定从热点区变为次热区,聊城、德州变为热点区,山东全境基本变为次热区;辽东半岛从次热区变为次冷区,蒙西地区和山西全境为冷点区;蒙东地区的呼伦贝尔、兴安、锡林郭勒、赤峰4盟(市)则由冷点区成为次冷区。另外,环渤海地区的氨氮排放热区变化十分明显(图4),在数量上,热点区地市从2005年的8个增至2012年的18个,而冷点区从24个减至13个,表明区域氨氮排放的空间溢出效应显著增强。在分布上,海河流域的热点区分布不断扩大,到2012年,属热点区的地市基本覆盖海河流域全境,淮河流域在2005均为冷点或次冷区,而到2012

年时鲁东和鲁西南地区的烟台、潍坊、青岛、菏泽、临沂、枣庄、济宁7地市已经成为热点区,其余地市均属于次热区,这表明2005年以来,海河和淮河流域氨氮排放的高强度集聚分布态势不断加剧。

4.2 环渤海地区水污染物排放的驱动因素

按照预设的影响因素回归模型,在SPSS 23.0软件支持下运用普通最小二乘法(OLS)进行回归参数估计。化学需氧量和氨氮排放的参数估计与检验结果如表4、表5所示,其中,总体模型是对环渤海地区全部地市单元的驱动因素参数估计。为考察高排放集聚区域在驱动因素上的差异性,进一步构建热区模型,对局部空间关联中处于热点区和次热区的地市单元进行参数估计。

4.2.1 化学需氧量排放驱动因素分析

在环渤海地区化学需氧量排放的总体模型和热区模型中,方差分析的 F 值分别为26.7017、

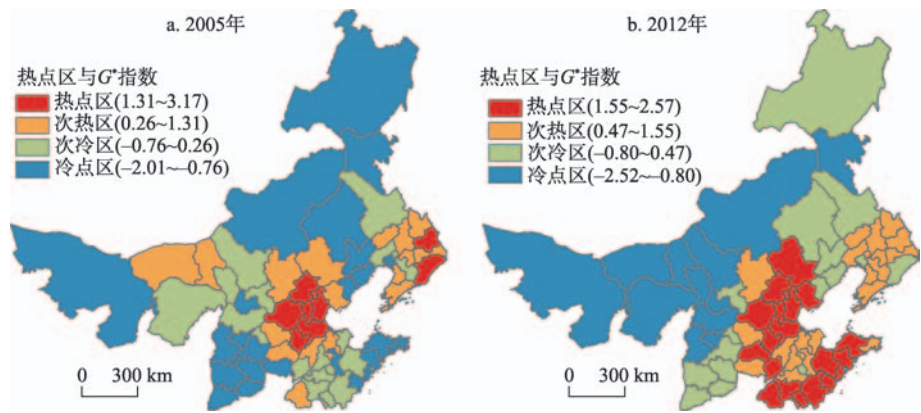


图4 2005-2012年环渤海地区氨氮排放的热区变化

Fig.4 Spatial change of hotspots of $\text{NH}_3\text{-N}$ discharge in the Bohai Rim Region, 2005-2012

表4 化学需氧量排放的参数估计结果

Tab.4 Estimation and test results of ordinary least squares (OLS) model for COD discharge

变量	总体模型				热区模型			
	系数	标准误差	t	Sig.	系数	标准误差	t	Sig.
constant	11.6640	2.6526	4.3972	0.0000	16.2826	2.7216	5.9826	0.0000
lnTP	0.1984	0.2156	0.9203	0.3611	-0.0996	0.1885	-0.5283	0.6029
lnUR	-0.9504***	0.3536	-2.6874	0.0093	-1.4097***	0.3813	-3.6973	0.0013
lnPGDP	-0.1331	0.1978	-0.6728	0.5037	-0.2982*	0.1775	-1.6804	0.1077
lnGRGDP	0.8730*	0.4792	1.8216	0.0736	0.1837	0.4687	0.3919	0.6991
lnIS	-0.7999**	0.3599	-2.2226	0.0301	-0.4772	0.3979	-1.1995	0.2437
lnFDI	-0.0240	0.0429	-0.5587	0.5785	0.1178	0.0721	1.6332	0.1173
lnFAI	0.6986***	0.2247	3.1085	0.0029	0.6658***	0.2206	3.0180	0.0065
P值	0.0000				0.0000			
F值	26.7017				11.3521			
调整后 R^2	0.7316				0.7213			
D.W值	1.9225				2.0711			

注:***、**和*分别表示显著性水平为0.01、0.05和0.1。

表5 氨氮排放的参数估计结果

Tab.5 Estimation and test results of ordinary least squares (OLS) model for NH₃-N discharge

变量	总体模型				热区模型			
	系数	标准误差	<i>t</i>	<i>Sig.</i>	系数	标准误差	<i>t</i>	<i>Sig.</i>
<i>constant</i>	4.7835	1.5686	3.0496	0.0034	6.2443	1.9030	3.2813	0.0026
<i>lnTP</i>	0.5822***	0.1275	4.5674	0.0000	0.5072***	0.1367	3.7105	0.0008
<i>lnUR</i>	-0.0943	0.2091	-0.4510	0.6537	-0.0566	0.2615	-0.2163	0.8303
<i>lnPGDP</i>	-0.2502**	0.1170	-2.1390	0.0366	-0.4285***	0.1313	-3.2643	0.0027
<i>lnGRGDP</i>	0.4116	0.2834	1.4523	0.1517	0.1617	0.3595	0.4496	0.6562
<i>lnIS</i>	0.0426	0.2128	0.2000	0.8422	0.3048	0.2800	1.0886	0.2850
<i>lnFDI</i>	0.0488*	0.0254	1.9206	0.0596	0.0820*	0.0455	1.8014	0.0817
<i>lnFAI</i>	0.2851**	0.1329	2.1456	0.0360	0.2892*	0.1458	1.9834	0.0565
<i>P</i> 值	0.0000				0.0000			
<i>F</i> 值	76.7771				39.1698			
调整后 <i>R</i> ²	0.8893				0.8784			
<i>D.W</i> 值	2.3247				2.1168			

注:***、**和* 分别表示显著性水平为0.01、0.05和0.1。

11.3521,其概率值均为0.000,小于0.01的显著性水平,Durbin-Watson(*D.W*)值分别为1.9225、2.0711,调整后 *R*²分别为0.7316、0.7213,说明 OLS 模型通过了显著性分析、不存在异方差性,且拟合程度较高。总体模型估计显示,经济增长速度、固定资产投资、城镇化水平以及工业化程度是环渤海地区化学需氧量排放的主要驱动因素,但各因素反映的影响效应差异显著。

具体来看,GDP增长率和全社会固定资产投资额每增长1个百分点,环渤海地区的化学需氧量排放分别提升0.8730%和0.6986%,经济增长速度、固定资产投资因素的较强正向拉动表明,环渤海地区存在显著的经济快增长、资本高投入与污染高排放的伴生效应,区域经济发展方式在相当程度上仍依靠要素粗放式投入,在关注经济增长的生产要素成本时,污染治理与环境保护成本亦亟需重视。而城镇化水平对化学需氧量排放呈显著负向影响,即城镇化率每提升1个百分点,环渤海地区化学需氧量排放将减少0.9504%,表明城镇居民的生产生活方式在降低化学需氧量排放强度方面发挥了积极作用。此外,工业化程度对化学需氧量排放的影响为负,第二产业增加值占GDP的比重每提升1个百分点,化学需氧量排放将减少0.7999%,工业化程度越高则化学需氧量排放趋低,表明了工业化过程对环渤海地区化学需氧量排放具有约束作用。进一步分析发现,环渤海地区化学需氧量以农业源排放为主,其排放比重达64.82%,远高于工业源(10.13%)、

城镇生活源(24.57%)的比重,除北京市以外,种植业、畜禽养殖业和水产养殖业等农业生产活动所产生的化学需氧量在环渤海地区作用尤为突出(图5)。

在化学需氧量高排放集聚区域的评估模型中,固定资产投资、城镇化水平的影响效应与总体模型较一致,而经济增长速度和产业结构因素的影响不显著。但是,经济发展水平因素对化学需氧量排放呈现出显著负向影响,人均GDP每提升1个百分点,化学需氧量排放将减少0.2982%,表明在环渤海

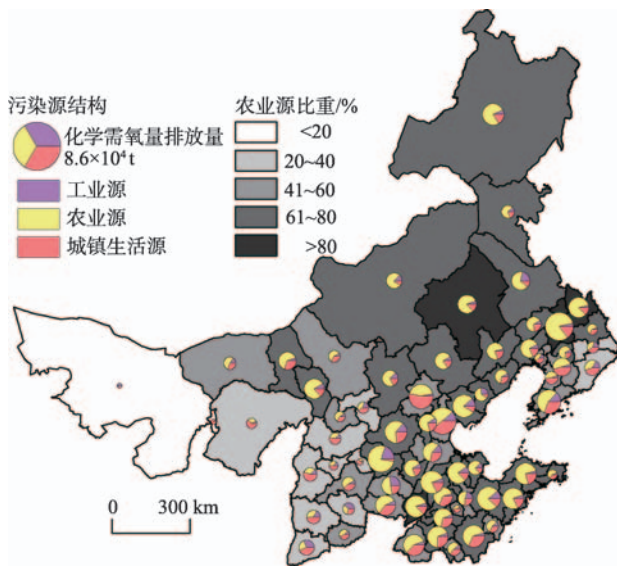


图5 2012年环渤海地区化学需氧量排放源结构及农业源比重分级

Fig.5 Sources of COD discharge and proportion of agricultural source in the Bohai Rim Region in 2012

地区的高排放集聚区内,经济发展水平因素能在一定程度上降低对区域环境胁迫程度,尽管目前作用程度还较为微弱。

4.2.2 氨氮排放驱动因素分析

在氨氮排放总体模型和热区模型的检验结果中(表5),两模型均在0.01上显著,调整后 R^2 值分别为0.8893和0.8784,表明显著性水平高、拟合效果较好。从总体模型估计来看,人口规模、外商直接投资、固定资产投资以及经济发展水平对环渤海氨氮排放具有影响。在正向驱动因素中,人口规模具有显著带动作用,年末常住人口数量每提升1个百分点将引起氨氮排放增长0.5822%,表明人口集中分布态势增强了氨氮排放集中度。固定资产投资和外商直接投资两类投资对氨氮排放均为正向带动,但带动程度有所差异,全社会固定资产投资额每提升1个百分点,氨氮排放量将增长0.2851%,而外商直接投资额1个百分点的提升仅带来0.0488%的氨氮排放增长,表明与化学需氧量排放一样,环渤海地区资本高投入与污染高排放的伴生效应仍然显著,境外资本总体上对区域环境胁迫程度相比内资较低,这可能与环渤海地区外资主要投向通信与电子设备、专用与通用设备等装备制造业、以及租赁与商务服务、房地产等服务业有关,这些生产活动的氨氮排放强度通常较低,在资源利用率和节能减排能力方面也会产生一定积极影响。

经济发展水平因素对氨氮排放呈负向驱动,人均GDP每增长1个百分点,环渤海地区氨氮排放将减少0.2502%,反映了经济发展水平对氨氮排放的显著抑制作用。另外,在氨氮排放的热区模型中,总体模型反映的四项因素在氨氮高排放集聚区域均呈相同影响效应,但热区模型的人均GDP变量体现了更强的抑制作用,人均GDP提升1个百分点将伴随氨氮排放量减少0.4285%。从已有研究来看,全国层面(陈祖海等, 2015; 马树才等, 2006)以及江西省(刘昕等, 2008)等省区,经济发展水平与主要水污染物排放量仍处于同步上升过程,即环境污染总量未到达EKC曲线拐点。而本文分析表明,环渤海地区在氨氮排放方面已呈现出向环境友好型方向升级趋势,人均GDP提升对其排放强度降低起到积极影响。

5 结论与讨论

(1) 海河流域是环渤海地区纳污量最大、增量

最突出的流域,其化学需氧量和氨氮排放分别占区域排放总量的38.94%、39.23%,辽河流域纳污量和增量次之。2005年以来,环渤海地区水污染物高排放区从零星分布向连片分布转变,京津冀、山东半岛、辽中南已成为化学需氧量和氨氮高排放区的叠加区域。环渤海地区水污染物排放具有显著空间溢出效应,且空间关联程度呈增大趋势。局部空间关联表明,环渤海地区水污染排放热度基本保持着从沿海向内陆递减态势,海河流域热度显著高于其他流域,沿海合作区显著高于内陆协作区。水污染排放的热点区和次热区覆盖范围由海河向淮河流域拓展,京津冀地区长期处于高排放集聚区域。由此可见,未来要着力推进环渤海地区联防联控和流域共治,加强跨行政区环境保护与治理合作,特别在沿海合作区内,应按流域统一确定污染控制重点区域,统一设置污染物排放标准和限值,统一实施一体化环境准入和退出机制,最大程度遏止水污染空间溢出效应。

(2) 环渤海地区不同水污染物排放的驱动因素差异显著,在化学需氧量排放方面,经济增长速度、固定资产投资因素呈较强的正向带动,而城镇化水平和工业化程度对化学需氧量排放呈显著负向影响,表明区域经济快增长、资本高投入与污染高排放之间伴生效应明显,而城镇化和工业化过程对区域化学需氧量排放具有约束作用。进一步分析发现,农业生产活动在环渤海化学需氧量排放中驱动作用突出。在氨氮排放方面,人口规模具有显著带动作用,固定资产投资和外商直接投资呈现一定正向影响。氨氮排放的总体模型估计显示,经济发展水平对氨氮排放的抑制作用显著,而热区模型估计表明,经济发展水平因素在水污染物高排放集聚区域的抑制作用显著或更强,反映出在环渤海地区、特别是热区分布的沿海合作区内,已呈现出EKC曲线中向环境友好型方向升级的趋势,人均GDP提升可对降低水污染物排放强度发挥积极影响。因此,在环渤海地区人口和城镇化战略制定时,要稳妥地推进人口迁移与城镇化进程,积极培育中小城镇,合理控制大城市人口规模,抑制污染物高排放区人口过快增长,切实降低区域性水环境污染;在发展方式转型上,要降低高耗能、重污染、低效益的低端落后产业投入强度,提升资本的投入产出效率,注重投资的环境保护收益,从根本扭转经济增长与污染排放伴生效应;同时,加强区域农业面源污染治理与农村污水分散式处理,严格畜禽养殖区划管

理,促进农业生产科学施肥施药和合理养殖种植。

(3)本文在水污染物排放驱动因素研究时,由于地市单元数据获取的局限性,主要侧重人口与经济类因素的影响,尽管模型拟合结果具有较好的解释力,但为更好地认识环渤海地区水污染物排放的驱动机制,对水资源利用效率与结构、技术进步、污染治理与投入、政府环境管治等科技与管理类因素的影响仍然需要进一步分析与验证。此外,环渤海地区诸流域水资源较贫乏,境内水体生态补给不足,生态流量难以保障,污染物扩散及其纳污能力较弱(贾绍凤等, 2003),对区域水污染格局也造成了极大影响,因而水环境本底条件对纳污能力的约束作用,也需要在后续研究中进一步关注。

参考文献(References)

- 陈媛媛, 李坤望. 2010. 开放条件下工业污染物排放强度影响因素分析[J]. 上海财经大学学报, 12(4): 90-97. [Chen Y Y, Li K W. 2010. The influencing factors of emission intensity of industrial pollutants under open economy[J]. Journal of Shanghai University of Finance and Economics, 12(4): 90-97.]
- 陈祖海, 雷朱家华. 2015. 中国环境污染变动的时空特征及其经济驱动因素[J]. 地理研究, 34(11): 2165-2178. [Chen Z H, Leizhu J H. 2015. The spatial-temporal characteristics and economic drivers of environmental pollution changes in China[J]. Geographical Research, 34(11): 2165-2178.]
- 程钰, 任建兰, 陈延斌, 等. 2016. 中国环境规制效率空间格局动态演变及其驱动机制[J]. 地理研究, 35(1): 123-136. [Cheng Y, Ren J L, Chen Y B, et al. 2016. Spatial evolution and driving mechanism of China's environmental regulation efficiency[J]. Geographical Research, 35(1): 123-136.]
- 高爽, 魏也华, 陈雯, 等. 2011. 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, 30(5): 902-912. [Gao S, Wei Y H, Chen W, et al. 2011. Study on spatial-correlation between water pollution and industrial agglomeration in the developed region of China: A case study of Wuxi City[J]. Geographical Research, 30(5): 902-912.]
- 郭卫华, 周永章, 阙兴龙. 2015. 1990-2012年广东省废水排放特征及其驱动因素: 基于STIRPAT模型和脱钩指数的研究[J]. 灌溉排水学报, 2015, 34(2): 7-10. [Guo W H, Zhou Y Z, Kan X L. 2015. Characteristics and driving factors of wastewater emissions in Guangdong Province from 1990 to 2012: A study based on STIRPAT model and de-coupling index[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 34(2): 7-10.]
- 国家发展改革委. 2015. 环渤海地区合作发展纲要[EB/OL]. 2015-10-12 [2016-08-01]. <http://www.sdpc.gov.cn/gzdt/201510/W020151023508435705942.pdf>. [National Development and Reform Commission. 2015. Bohai Rim region cooperation development plan[EB/OL]. 2015-10-12 [2016-08-01]. <http://www.sdpc.gov.cn/gzdt/201510/W020151023508435705942.pdf>.]
- 纪建悦, 于富洋, 方胜民. 2012. 环渤海地区经济与海洋环境的耦合度研究[J]. 海洋环境科学, 31(6): 847-850. [Ji J Y, Yu F Y, Fang S M. 2012. Study on coupling degree between economy and marine environment in Bohai Sea Rim[J]. Marine Environmental Science, 31(6): 847-850.]
- 贾绍凤, 张士锋. 2003. 海河流域水资源安全评价[J]. 地理科学进展, 22(4): 379-387. [Jia S F, Zhang S F. 2003. Water resources security appraisal of Haihe Basin[J]. Progress in Geography, 22(4): 379-387.]
- 蒋伟, 赖明勇. 2009. 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, 20(6): 1-6, 19. [Jiang W, Lai M Y. 2009. Spatial dependence and FDI location determinants: Spatial econometrical analysis based on Chinese urban data[J]. Finance and Trade Research, 20(6): 1-6, 19.]
- 刘满凤, 谢晗进. 2014. 中国省域经济集聚性与污染集聚性趋同研究[J]. 经济地理, 34(4): 25-32. [Liu M F, Xie H J. 2014. The convergence research of economy aggregation and pollution aggregation among China's provinces[J]. Economic Geography, 34(4): 25-32.]
- 刘昕, 熊晓波, 贾俊松, 等. 2008. 社会经济因素对中部地区环境压力的影响分析: 以江西省为例[J]. 人口研究, 32(3): 75-78. [Liu X, Xiong X B, Jia J S, et al. 2008. Shehui jingji yinsu dui zhongbu diqu huanjing yali de yingxiang fenxi: Yi Jiangxisheng weili[J]. Population Research, 32(3): 75-78.]
- 陆大道. 2015. 中速增长: 中国经济的可持续发展[J]. 地理科学, 35(10): 1207-1219. [Lu D D. 2015. Moderate-speed growth: Sustainable development of China's economy[J]. Scientia Geographica Sinica, 35(10): 1207-1219.]
- 马树才, 李国柱. 2006. 中国经济增长与环境污染关系的Kuznets曲线[J]. 统计研究, 23(8): 37-40. [Ma S C, Li G Z. 2006. The Kuznets Curve of relationship between economic growth and environmental pollution[J]. Statistical Research, 23(8): 37-40.]
- 牛海鹏, 朱松, 尹训国, 等. 2012. 经济结构、经济发展与污染物排放之间关系的实证研究[J]. 中国软科学, (4): 160-166. [Niu H P, Zhu S, Yin X G, et al. 2012. Empirical study on the relationship among economic structure, eco-

- conomic development and pollutant emission[J]. *China Soft Science*, (4): 160-166.]
- 孙才志, 李欣. 2013. 环渤海地区海洋资源、环境阻尼效应测度及空间差异[J]. *经济地理*, 33(12): 169-176. [Sun C Z, Li X. 2013. Measurement and spatial analysis of marine resources and environment damping effect in the Bohai Sea Ring area[J]. *Economic Geography*, 33(12): 169-176.]
- 唐德才. 2009. 工业化进程、产业结构与环境污染: 基于制造业行业 and 区域的面板数据模型[J]. *软科学*, 23(10): 6-11. [Tang D C. 2009. Industrialization, industry structure and environment pollution: Based on manufacturing industry and regional panel model[J]. *Soft Science*, 23(10): 6-11.]
- 王强, 刘雅玲, 吴悦颖, 等. 2015. 我国主要污染物排放强度区域特征分析研究[J]. *环境保护科学*, 41(3): 57-61. [Wang Q, Liu Y L, Wu Y Y, et al. 2015. Analysis of spatial characteristics of emission intensity of the main pollutants in China[J]. *Environmental Protection Science*, 41(3): 57-61.]
- 王书明, 周寒. 2015. 竞争、合作与生态文明建设合作制度的建构: 结合环渤海区域水污染治理的思考[J]. *哈尔滨工业大学学报: 社会科学版*, 17(6): 103-108. [Wang S M, Zhou H. 2015. Competition, cooperation and construction of cooperative system of ecological civilization: Study on the problems of water pollution governance around the Bohai Sea Region[J]. *Journal of HIT: Social Sciences Edition*, 17(6): 103-108.]
- 吴凯. 1997. 环渤海区域水环境问题及其防治对策[J]. *地理科学*, 17(3): 231-236. [Wu K. 1997. The status quo and the preventing and controlling countermeasures for the water environment problems in the region surrounded by the Bohai Sea[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 17(3): 231-236.]
- 夏军. 2002. 华北地区水循环与水资源安全: 问题与挑战[J]. *地理科学进展*, 21(6): 517-526. [Xia J. 2002. A perspective on hydrological base of water security problem and its application study in North China[J]. *Progress in Geography*, 21(6): 517-526.]
- 项尧尧. 2015. 环境污染对环渤海沿海地区经济的“增长阻力”研究[D]. 青岛: 中国海洋大学. [Xiang Y Y. 2015. Research on economic “growth drag” caused by environmental pollution in the Bohai coastal areas[D]. Qingdao, China: Ocean University of China.]
- 徐林清, 聂楠. 2015. 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*, 31(5): 160-165. [Xu L Q, Nie N. 2015. Spatial agglomeration and influencing factors of pollutant emissions: The analysis based on ridge regression model[J]. *Ecological Economy*, 31(5): 160-165.]
- 徐胜, 王晓惠, 宋维玲, 等. 2011. 环渤海地区经济增长与环境污染关系分析: 基于环境库兹涅茨曲线[J]. *海洋通报*, 30(6): 601-606. [Xu S, Wang X H, Song W L, et al. 2011. Analysis of the relationship between economic growth and environmental pollution in Circum-Bohai-Sea Zone: Based on environmental Kuznets Curve[J]. *Marine Science Bulletin*, 30(6): 601-606.]
- 赵红, 彭馨. 2013. 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[J]. *南京农业大学学报: 社会科学版*, 13(1): 103-112. [Zhao H, Peng X. 2013. Trade, relative income and emissions of the pollutants: A study based on panel data from provincial level units[J]. *Journal of Nanjing Agricultural University: Social Sciences Edition*, 13(1): 103-112.]
- 赵小凤, 黄贤金, 张兴榆, 等. 2009. 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*, 30(6): 1580-1587. [Zhao X F, Huang X J, Zhang X Y, et al. 2009. Application of spatial autocorrelation analysis to the COD, SO₂ and TSP emission in Jiangsu Province[J]. *Environmental Science*, 30(6): 1580-1587.]
- 周侃. 2016. 中国环境污染的时空差异与集聚特征[J]. *地理科学*, 36(7): 989-997. [Zhou K. 2016. Spatial-temporal differences and cluster features of environmental pollution in China[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 36(7): 989-997.]
- 周侃, 樊杰. 2016. 中国环境污染源的区域差异及其社会经济影响因素: 基于339个地级行政单元截面数据的实证分析[J]. *地理学报*, 71(11): 1911-1925. [Zhou K, Fan J. 2016. Regional disparity of environmental pollution source and its socio-economic influencing factors: Based on the cross-section data of 339 cities at prefecture level or above in China[J]. *Acta Geographica Sinica*, 71(11): 1911-1925.]
- 朱悦. 2013. 环渤海地区经济增长与环境污染关系[J]. *辽宁工程技术大学学报: 自然科学版*, 32(7): 968-977. [Zhu Y. 2013. Relationship between economic growth and environmental pollution in Circum-Bohai-Sea Zone[J]. *Journal of Liaoning Technical University: Natural Science*, 32(7): 968-977.]
- Anselin L. 1988. *Spatial econometrics: Methods and models* [M]. Dordrecht, Netherlands: Kluwer Academic Publishers.
- Ehrlich P R, Holdren J P. 1971. Impact of population growth [J]. *Science*, 171: 1212-1217.
- Grossman G M, Krueger A B. 1995. Economic, growth and the environment[J]. *The Quarterly Journal of Economics*, 110(2): 353-377.
- Hosseini H M, Kaneko S. 2013. Can environmental quality spread through institutions[J]. *Energy Policy*, 56: 312-321.

Spatiotemporal patterns and driving forces of water pollutant discharge in the Bohai Rim Region

ZHOU Kan^{1,2}, FAN Jie^{1,2}, LIU Hanchu^{1,2}

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

2. Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China)

Abstract: A clear understanding of the spatiotemporal patterns and driving forces of water pollutant discharge has a crucial practical significance for regional joint reduction and prevention of water pollution. Based on the cross-section data of water pollutant discharge and socioeconomic parameters in 67 cities at the prefectural level or above, the spatiotemporal patterns and effects of spatial association of water pollution are quantitatively measured in the Bohai Rim region. Meanwhile, the socioeconomic drivers of water pollutant discharge are estimated by using the econometric model, and some suggestions for the reduction and control of regional water pollution are put forward. The results show that: (1) The Haihe River Basin is the largest and the most prominent watershed with regard to the total quantity and increment of water pollutants in the Bohai Rim Region. Its COD and NH₃-N discharges accounted for 38.94% and 39.23% of the regional total discharges, respectively. (2) The spatial pattern of high water pollutant discharge areas has changed greatly, from scattered to continuous distribution since 2005. The Beijing-Tianjin-Hebei region, the Central and Southern Liaoning region, and the Shandong Peninsula region become the superimposed areas of high discharge zone of COD and NH₃-N. (3) Discharges of water pollutants have significant spatial association effects in the Bohai Rim region, and the significance of water pollutant discharge presents a general decreasing trend from the coastal area to inland areas. Moreover, the Beijing-Tianjin-Hebei region has been situated in the hotspots for a long period, and the coverage of hotspot and sub-hotspot areas has expanded continuously from the Beijing-Tianjin-Hebei region to the Haihe River and Huaihe River Basin since 2012. (4) By means of an ordinary least squares (OLS) model estimation, it is demonstrated that there are significant differences in the driving forces of water pollutant discharges. Economic growth rate and fixed asset investment show marked positive correlation with COD discharge, and the level of urbanization and industrialization act as a disincentive to COD discharge. Population size is the primary driving factor of NH₃-N discharge in the Bohai Rim region, and fixed asset investment and foreign direct investment also show marked positive correlation with NH₃-N discharge. There is an appreciable association of high capital investment and high water pollutant discharge in the Bohai Rim region. But high economic development level depresses the discharge of water pollutant, especially in the accumulation zone of high intensity discharge.

Key words: water pollutant discharge; spatiotemporal pattern; spatial association; driving force; Bohai Rim Region