

1995-2012年中国突发性环境污染事件 时空演化特征及影响因素

丁 镭¹, 黄亚林², 刘云浪¹, 刘 超², 程胜高^{1*}

(1. 中国地质大学(武汉)环境学院, 武汉 430074; 2. 中国地质大学(武汉)公共管理学院, 武汉 430074)

摘 要:利用ESDA空间统计分析方法和Matlab空间面板计量模型,对1995-2012年中国各地区发生的环境污染事件的时空演化特征和影响因素进行分析。结果表明:环境污染事件呈先动态增长后逐渐下降的趋势,水污染和大气污染事件是主要事故类型;环境污染事件发生的高频风险区域亦在逐渐减少,东南沿海及四川、湖南等中西部区仍有局部集聚的态势;1995-2000年中国的环境污染事件总体呈随机分布状态,2001年后则开始呈现集聚的特征;Moran散点图表明,局部的空间集聚先增强后减弱,环境污染事件近年来集中在泛长三角地区,高高地区为江浙沪;环境污染事件的重心转移方向主要为西南和东北,两个快速转移时期分别为1998-2001和2004-2007年,这与区域的产业转移和高负荷的污染排放压力有关;环境污染事件的发生与污染物的达标排放和控制、经济发展阶段及环境治理投入、环境监管能力、空间效应等因素有关。空间效应主要体现在空间邻近效应和空间溢出效应。未来应注重环境污染事故的区域联防联控,制定若干跨界污染事故的应急响应联动机制及环境污染区域联防联控机制。

关键词:突发性环境污染事件;探索性空间分析方法;时空演化特征;空间效应;中国

1 引言

突发性环境污染事件有别于一般的环境污染,它发生突然迅猛,瞬间污染物排放量大,且没有固定的排放途径,不易控制,对环境影响较大且对生命与生产安全构成巨大威胁(Wiens et al, 1995)。中国由于城市化与工业化进程的快速推进,突发性环境污染事件频发,尤其是一些特大环境污染事故,如2005年的松花江水污染事件(Zhu et al, 2007)、2013年上海松江死猪事件、2013年青岛输油管道爆炸事件等,既严重危害着社会稳定和人民健康,又极大地影响了中国生态文明建设进程,如何有效预防突发性环境污染事件的发生是中国面临的一大挑战。

近年来,国内外学者在关注环境污染的同时也广泛开展着环境污染事件的相关研究。首先,利用

数理统计分析方法,针对环境污染事件的历史数据,在时间序列上进行了比较和演化特征分析。如Lennox等(1998)对比分析了北爱尔兰、英格兰等地区的农业面源突发性污染事件的时间变化特征及主要原因;Yu等(2009)分析和评价了2002-2006年中国主要环境污染事件特征,并建议构建一个历史事故数据库进行长远系统的风险识别和控制;此外,还有不少学者对多年来中国环境污染事故发生的频数进行了时间序列上的特征分析(李静等, 2008; 杨洁等, 2010; 范小杉等, 2012)。其次,由于环境污染事件发生的突然性、不确定性和危害性,使得污染事故的风险评估(Wirtz et al, 2007; Mohd et al, 2014)、损失估算(Zeng et al, 2005)、风险综合区划(Xue et al, 2011)、污染事故模拟(王晓等, 2008; 韩素芹等, 2009)和事故应急管理决策(Lee et al, 2006; He et al, 2011)成为学者关注的另一个焦点,以期为

收稿日期:2014-07;修订日期:2015-01。

基金项目:国家自然科学基金项目(70473072);湖北省环保科技课题专项(2012HB03)。

作者简介:丁镭(1988-),男,浙江天台人,博士研究生,主要从事环境地理研究,E-mail: dinglei3616028@163.com。

通讯作者:程胜高(1954-),男,湖北黄石人,教授,主要从事环境影响评价研究,E-mail: chengsg@cug.edu.cn。

引用格式:丁镭,黄亚林,刘云浪,等. 2015. 1995-2012年中国突发性环境污染事件时空演化特征及影响因素[J]. 地理科学进展, 34(6): 749-760. [Ding L, Huang Y L, Liu Y L, et al. 2015. Spatiotemporal variability of sudden environmental pollution incidents and influencing factors in China, 1995-2012[J]. Progress in Geography, 34(6): 749-760.]. DOI: 10.18306/dlkxjz.2015.06.010

区域环境污染事故的风险防范和预警提供基础,降低污染事件带来的破坏性和损失。再次,还有学者重点探讨了环境污染事故发生的影响因素。如杨洁等(2010)分析了环境污染事故发生与经济动态关系,并利用因素分解方法,构建了环境污染事故频数变化的完全分解模型,分析其与经济规模、污染治理和风险控制水平的关系(杨洁等,2013)。然而,环境污染事故的发生是多因素共同作用的结果,空间尺度的效应研究可认识污染事故发生频次的区域差异、区域转移和扩散,有助于认识环境污染事件的分布规律和发展趋势;研究邻域单元间的空间联系和相关性,则有助于对中长期事故的发生作出正确的判断和预测。由Tobler(1970)的地理学第一定律可知,所有的地理现象或者事物在空间上都存在一定的相互联系或影响,且距离相近的事物之间会有更紧密的联系或相互影响。同时,随着区域社会经济一体化过程的加快,环境污染的区域性集聚特征更为明显,环境污染事故的发生亦逐渐表现出空间集聚特征。如大气、水污染事故的跨界影响,交通事故带来的环境污染的空间转移等使得突发性环境污染事件的区域空间关联性变得越复杂,联防联控亦成为区域环境污染事件应急和防范的必要措施(杨小林等,2014)。

基于此,本文以1995-2012年中国省级单元的环境污染事件为研究对象,利用ESDA空间统计分析方法和Matlab空间面板计量模型探讨事件发生的时空演化特征、驱动机制及其外部影响因素,旨在为环境污染事件的风险预防、区域环境污染的控制管理提供理论支持,也为不同区域间的环境污染事件联防联控和环境政策制定提供参考。

2 数据来源和研究方法

2.1 数据来源

历年的环境污染事件(次数)及其他相关经济指标数据主要来源于1996-2013年的《中国统计年鉴》和《中国环境统计年鉴》,2012年的环境污染事件相关数据,还参考了2013年的中国环境统计公报。由于统计数据缺失等原因,研究范围暂未包括香港和澳门特别行政区、台湾省以及钓鱼岛、三沙市等地区。

2.2 研究方法

2.2.1 空间统计分析方法

主要为探索性空间分析方法(ESDA),由全局空

间自相关指数(Moran's I)和局部空间自相关指数(Moran 散点图)来测度(Hsueh et al, 2012; 李瑞等, 2013; 周扬等, 2014)

(1) 全局空间自相关。Moran's I 指数,反映变量的空间集聚和关联程度。计算公式如下:

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

式中: I 为全局Moran's I 指数; n 为省区总数; x_i, x_j 分别为省区*i*和*j*的环境污染事件次数, \bar{x} 为某个年份全部省区环境污染事件次数的均值, 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 $[-1,1]$ 之间,若 $I < 0$,表明省域环境污染事件存在空间负相关关系,污染事件的发生倾向于空间离散,表明不同省份的环境污染事件发生次数有较大的空间异质性质;若 $I > 0$,则表明省域环境污染事件空间正相关,污染事件的发生倾向于空间集聚,不同省份的环境污染事件存在一定的空间关联影响;若 $I = 0$,则说明省域环境污染事件呈随机分布的态势。显著性水平利用Geoda软件的蒙特卡罗方法进行检验(杨振山等, 2010; 高超等, 2013)。

(2) 局部空间自相关。全局空间自相关反映的是环境污染事件在全国整体上的一个空间差异水平,但难以反映省域局部空间的差异和变化,需要通过Moran 散点图、Local Moran's I 统计量等局部空间自相关方法来检验,用以揭示局部层面各邻近地理单元的空间相互作用关系。其中,Moran 散点图,描述变量与其空间滞后向量的相关关系,反映了空间单元观察值之间关联和差异程度,共由4个象限组成,即为高高(HH)型、高低(HL)型、低高(LH)型、低低(LL)型,分别代表某省域环境污染事件与其邻域省份的环境污染事件的4种关系:HH为自身与邻域省份的环境污染事件次数均高(存在较强的空间正相关,为热点区),HL为自身事件数值高,而邻域事件数值低(存在较强的空间负相关,异质性突出),LH为自身事件数值低,而邻域事件数值高(存在较强的空间负相关,异质性突出),LL为自身事件数值和邻域事件数值均低(存在较强的空间正相关,为盲点区)。

2.2.2 空间重心转移曲线

重心转移曲线,描述区域事物分布的时空特性和转移方向。重心转移的绘制方法主要有基于ArcGIS标准偏差椭圆SDE绘制的中心算法(Wong,

1999; Gong, 2002)、空间重心公式(匡文慧等, 2005)、CTCSTP算法(李光强等, 2013)及基于省会中心平均的区域重心分析法(杨万江等, 2011)等多种方法, 其中SDE方法计算最为便捷、高效。本文选用SDE方法及区域重心分析法(重心转移距离)来度量, 其中SDE的空间范围表示地理要素空间分布的主体区域; 中心表示地理要素空间分布的相对位置, 方位角反映分布的主趋势方向; 空间重心转移的距离公式为:

$$D = E \times \sqrt{(L_i - L_j)^2 + (B_i - B_j)^2} \quad (2)$$

式中: D 为环境污染事件重心点之间的转移距离; E 为常数项, 是将经纬度坐标转换为平面距离所获得的数值, 这里取111.111 km; L_i, L_j, B_i, B_j 分别表示第*i*年和第*j*年的重心点的经、纬度值。

2.2.3 空间计量经济模型

空间计量经济学是在传统的计量经济学模型中增加经济变量的空间效应, 用于分析事物之间存在的空间相关性和空间异质性(Anselin, 1988)。作为计量经济学的一个重要分支, 空间计量经济模型现已广泛应用于环境和资源经济的相关研究中。为揭示环境污染事件发生次数的省域空间经济关系, 这里引入空间计量经济学方法, 构建空间面板计量模型用以分析中国突发性环境污染事件发生的空间演变成因及其驱动因素。具体为: 利用MatlabR2010a软件中的Spatial软件包, 通过构建地理矩阵权重(相邻为1, 不相邻则为0), 进行计算。

空间计量经济模型主要分为空间滞后和空间误差两类基本模型, 在面板数据分析时, 则有空间滞后面板模型(SLM-Panel)和空间误差面板模型(SEM-Panel), 其基本公式如下(Elhorst, 2010):

SLM-Panel:

$$Y_{it} = \delta \sum_{j=1}^n w_{ij} Y_{jt} + X_{it} \beta + \mu_i + \lambda_t + \varepsilon_{it} \quad (3)$$

SEM-Panel:

$$Y_{it} = X_{it} \beta + \mu_i + \lambda_t + \varphi_{it}, \quad \varphi_{it} = \sum_{j=1}^n w_{ij} \varphi_{jt} + \varepsilon_{it} \quad (4)$$

式中: Y_{it} 为时间*t*的横截面个体*i*的因变量; X_{it} 为自变量; $\sum w_{ij} Y_{jt}$ 为因变量的空间效应, δ 为因变量空间效应系数; μ_i, λ_t 分别为空间固定和时间固定效应; $\sum w_{ij} \varphi_{jt}$ 为误差项空间效应; ρ 为误差项空间效应系数; β 为变量系数。

3 中国环境污染事件的时空演化特征

3.1 时间演化特征

从全国的时间变化尺度来看, 1995-2012年的突发性环境污染事件的总体变化呈现先动态增长后逐渐下降的趋势(图1)。事件发生次数在418~2411次之间, 总频次为23004次, 年均1278次, 2000年(2411次)出现一次大的高数值, 后逐渐减小, 并于2007年后趋向稳定, 说明突发性环境污染事件总体上得到有效控制。其中2006年为转折点, 这可能因为该年1月国务院出台了《国家突发环境事件应急预案》, 作为一个纲领性和政策性的指导文件, 它对各地区建立健全突发环境事件应急机制, 提高政府的应急能力和减缓事件损失起了重要作用。

从环境污染事件发生的所属类型来看(图2), 水

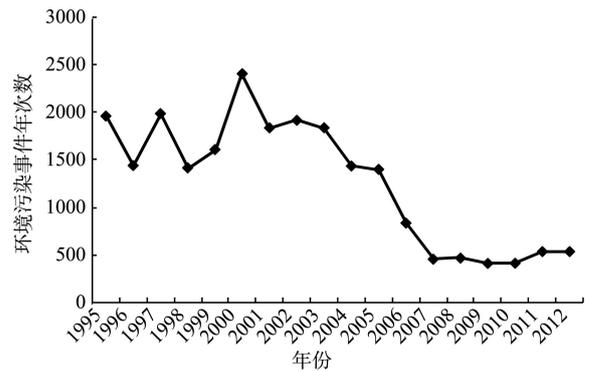


图1 1995-2012年中国突发性环境污染事件的年际总频次变化

Fig.1 Frequency of environmental pollution incidents in China, 1995-2012

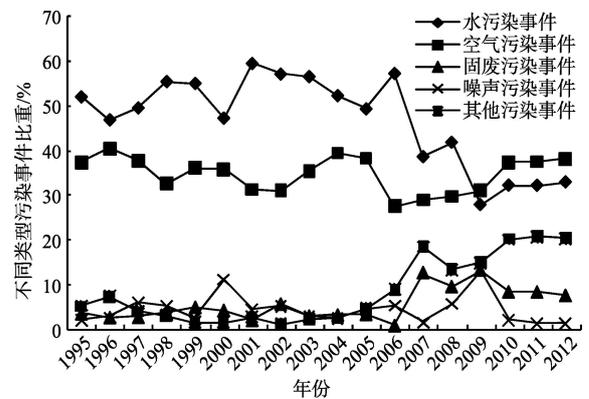


图2 1995-2012年中国突发性环境污染事件各类型比重的年际变化

Fig.2 Proportion of different types of environmental pollution incidents in China, 1995-2012

和大气是污染事件发生的主体。1995-2012年间,水体污染事件发生总次数为11640次,年均达到647次,占总数的50.60%;18年间的大气污染事件发生总次数为8116次,年均达到451次,占总数的35.28%;两者占到了污染总数的85.88%。值得注意的是,水和大气作为污染物扩散的介质,是环境污染事件发生空间效应的重要因素。

3.2 空间演化特征

3.2.1 总体空间分布变化

利用ArcGIS工具将1995-2012年31个省、自治区和直辖市的环境污染事件,按照自然断裂点划分为从高到低的5个等级(高频区201~470次、中高频区101~200次、中低频区51~100次、低频区16~50次和极低频或未统计区0~15次),并选择1995(起始年)、2000(峰值年)、2006(转折年)和2012年(结束年)作为分析断面,绘制其总体空间分布图(图3)。

从图3可知:①4个断面时间点的环境污染事件超过100次的省区分别有7、8、5和1个,环境污染事件发生的高频风险区域在逐渐减少。②1995-2012年,西部和东北地区的环境污染事件总体数量相对较少,中东部地区相对较多。③从不同时间段的变化来看,1995-2000年,环境污染事件有着从东

部地区向中西部扩散转移的趋势(图3a→3b);而2006-2012年以后(图3c→3d),在总量相对减少的情况下,东南沿海及川渝等中西部地区仍有局部集聚的态势,如上海的环境污染事件发生频率在2011和2012年达到了历史新高的197和192次,个别区域的环境污染事故防治仍刻不容缓。此外,从各省区的累计总频次亦可以看出,环境污染事件发生的高频地区主要集中在江浙鲁等东部沿海地区,湘赣等中部地区、粤桂滇等南部地区和川甘等西部地区,其中广西数量最多达到了2940次,这与区域经济快速发展,重化工企业等危险污染源布局有关(Xue et al, 2011)。

3.2.2 空间关系变化

(1) 全局空间关系变化。分别计算1995-2012年的全局Moran's I 指数,结果见表1,表中 $E(I)$ 为数学期望值, $p(I)$ 显著性水平。从中可以看出:①环境污染事件的Moran's I 指数值由1995年的0.003,逐渐波动增长到2012年的0.248,这表明环境污染事件的发生总体上由最初的随机分布转向了空间集聚分布;2000-2001年是由随机向集聚转变的时期,之后虽然集聚的程度有所波动,但总体表现出高事故发生率地区的高集聚(东南沿海),低事故发生

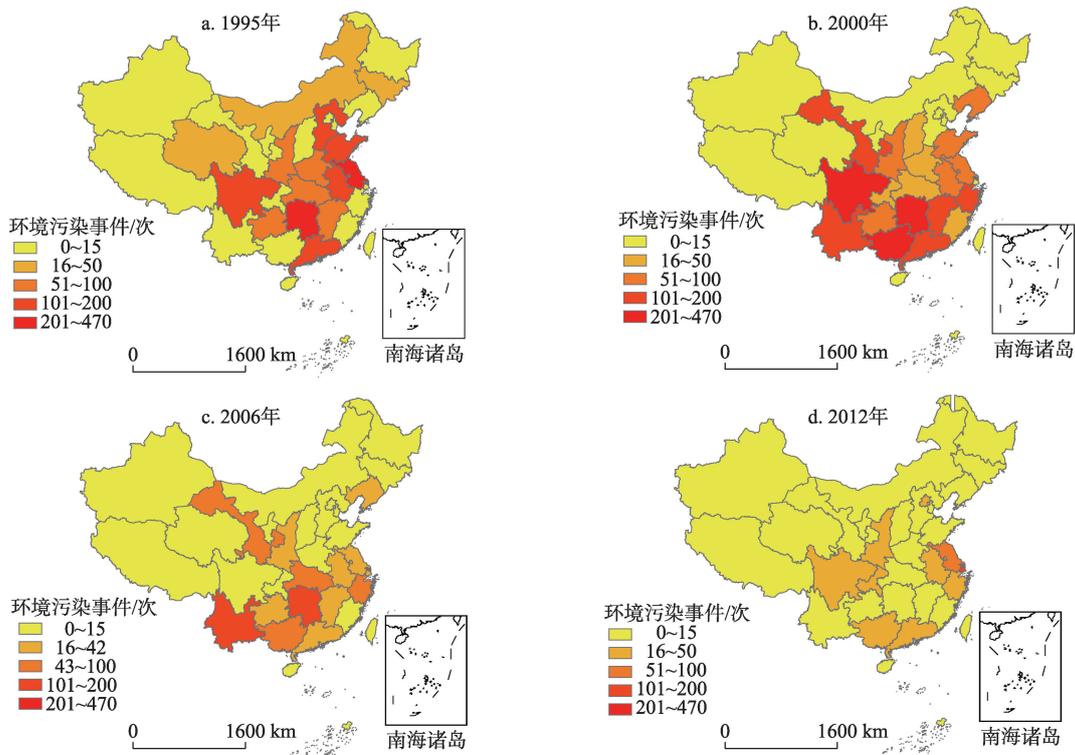


图3 1995-2012年中国环境污染事件的省级空间分布差异及演化

Fig.3 Spatial distribution of environmental pollution incidents in China, 1995-2012

表1 环境污染事件的全局 Moran's I 估计值比较

Tab.1 Estimations of Moran's I for the environmental pollution incidents in China based on Monte Carlo method

年份	Moran's I	E(I)	Sd.	p(I)
1995	0.003	-0.03	0.104	0.365
1996	-0.046	-0.03	0.105	0.473
1997	0.013	-0.03	0.098	0.302
1998	-0.086	-0.03	0.107	0.317
1999	0.081	-0.03	0.104	0.134
2000	0.065	-0.03	0.102	0.149
2001	0.232	-0.03	0.099	0.016
2002	0.225	-0.03	0.099	0.023
2003	0.154	-0.03	0.103	0.055
2004	0.216	-0.03	0.101	0.020
2005	0.169	-0.03	0.104	0.037
2006	0.183	-0.03	0.107	0.039
2007	0.019	-0.03	0.105	0.287
2008	0.157	-0.03	0.097	0.044
2009	0.156	-0.03	0.087	0.031
2010	0.104	-0.03	0.058	0.021
2011	0.096	-0.03	0.053	0.014
2012	0.248	-0.03	0.065	0.004

地区的低低集聚(西北部地区)。②从各时段 Moran's I 指数变化来看,1995-1998年为正值到负值的交替转变,体现了全局的空间负相关和异质性,区域环境污染事件发生的差异较大;1999年后 Moran's I 值开始变为正值,并在2001-2012年间趋于平稳变化,除2007年的指数值0.02较小外(随机分布),Moran's I 值整体处于[0.096, 0.248]的变化区间,呈现正相关性,趋于集聚的态势(蒙特卡洛检验结果表明在0.1水平上均为显著),空间同质性在增强,说明环境污染事件的发生在毗邻省区存在一定的空间相互作用关系。

(2) 局部空间关系变化。用GeoDa软件创建邻接的权重矩阵,绘制环境污染事件的Moran散点图,选取上述4个断面时间点进行比较分析,结果见图4,其中横坐标为各省区变量的观测值,纵坐标为某区域与其周围相邻接区的观测值的空间平均值(亦称空间滞后值)。

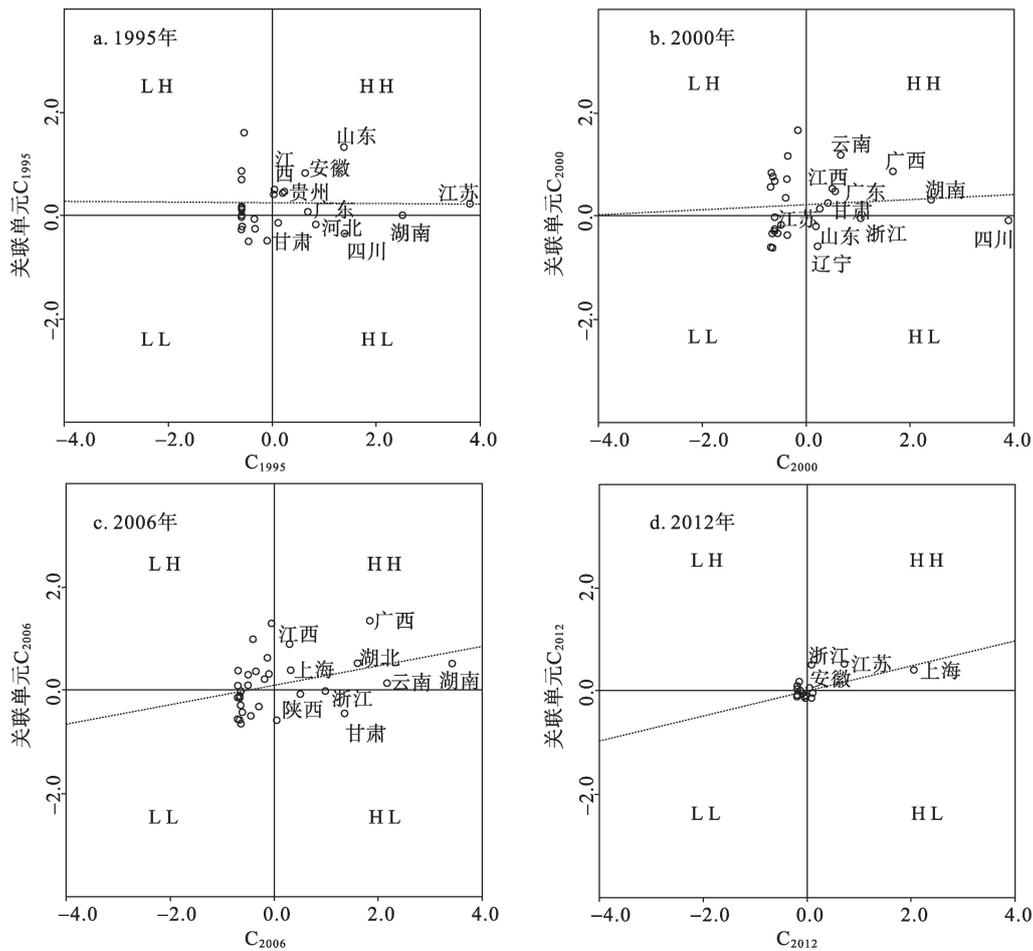


图4 1995-2012年中国环境污染事件Moran散点图(C_{1995} , C_{2000} , C_{2006} , C_{2012} 分别为1995、2000、2006、2012年环境污染事件次数标准化值)

Fig.4 Moran scatter plot of environmental pollution incidents in China, 1995-2012

(C_{1995} , C_{2000} , C_{2006} , C_{2012} represents standardized value of environmental pollution incidents in 1995, 2000, 2006, and 2012, respectively)

从图4可发现:①HH地区从1995年的6个增加到2000年的8个,再逐渐减小到2006年的6个和2012年的4个,说明局部的环境污染事件的空间集聚能力先增强后减弱,近年来集中于泛长三角地区(上海、浙江、江苏、安徽)。以上海为例,其在2000年后的环境污染事件次数有明显上升的趋势,一方面,上海及周边地区有大量的传统重化工企业,产业结构和布局性环境风险隐患问题突出(薛鹏丽等, 2011);另一方面,上海与周边地区的经济活动频繁,物流运输多,又受台风、暴雨等自然灾害的影响较大,使得车祸、爆炸、化学污染事故等环境事故显现(杨娅等, 2012)。②LL地区的省份相对较多,主要集中在西部经济、工业发展水平较为落后的省区,如西藏、青海,此外还与统计年鉴中个别年份、个别地区数据缺失有关。③HL地区的省份数量基本保持不变,相对数量也较少;LH地区的省份数量有先增多后减少的趋势,综合说明环境污染事件的空间数量差异性在减弱。

3.2.3 空间重心转移

为进一步定量、直观地揭示环境污染事件发生的区域变迁过程,借用 ArcGIS 空间分析模块的 SDE 标准差椭圆来绘制环境污染事件发生的重心转移轨迹曲线(图5)以及根据式(2)计算各个年份的

连续性时间序列的重心转移距离,表2给出了部分典型年份的计算结果。

由图5可知:中国环境污染事件发生的重心集中在 111.134°~116.626°E、29.57°~32.868°N 之间,重心地集中在湖北、湖南、河南、安徽等中部省区,并一直处于中国几何中心(103.50°E, 36°N)的东南方向,表明中国东部和南部地区是环境环境污染事件发生的高危风险区域。

此外,结合表2可以发现:①中国环境污染事件重心转移方向主要分为两个阶段:1995-2001年的西南方向转移和2004-2010年间的东北方向转移,表明环境污染事件先向西南省区快速集聚,后向江浙沪鲁为代表的东部沿海地区快速集聚;②从环境污染事件的重心转移速率可以看出,1998-2001年(西南)和2004-2007年(东北)的转移速率明显高于其他年份,说明这期间环境污染事件的区域转移强度更高、空间异质性更强;始于2000年的西部大开发战略带来的区域产业(经济活动)转移可能与1998-2001年的重心快速转移有关,高污染企业(包括大量中小企业)的快速上马与疏于调控管理的环境政策滋生了环境污染事件的发生,如2009年和2012年的陕西凤翔儿童血铅超标事件等均与高污染企业西迁关系密切。而于2004年实施的中部崛

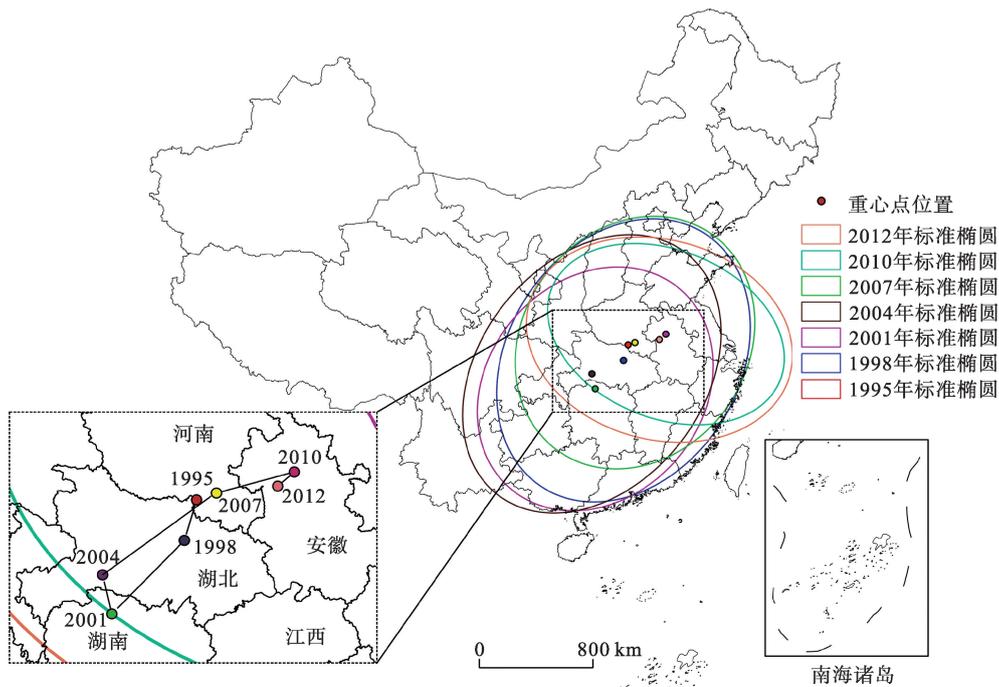


图5 1995-2012年中国环境污染事件发生重心转移轨迹

Fig.5 Change in the center of environment pollution incidents in China, 1995-2012

表2 1995-2012年中国环境污染事件发生重心转移轨迹

Tab.2 The center of environment pollution incidents in china, 1995-2012

年份	重心坐标			重心移动		
	经度(L)	纬度(B)	转角/(θ°)	方向	距离/km	速率/(km/a)
1995	113.867	32.340	47.04			
1998	113.505	31.412	30.08	西南	117.67	39.22
2001	111.306	29.570	36.79	西南	318.73	106.24
2004	111.134	30.573	35.86	西北	113.07	37.69
2007	114.384	32.505	31.98	东北	420.09	140.03
2010	116.626	32.868	113.54	东北	252.35	84.12
2012	116.122	32.547	106.25	西南	66.39	33.20

起战略及促进长三角经济区的发展战略,导致2007年长三角经济进入重化工阶段(高耗能、高耗水),环境压力也随之而来,工业“三废”排放进入高峰期,这也是后期环境污染事件重心往东北方向转移的重要原因。

4 中国环境污染事件的影响因素

4.1 全局状态的环境污染事件相关性分析

杨洁等(2010)研究表明,环境污染事件的发生有别于环境污染物的排放,它不是经济发展过程中的必然产物,具有极大的突发性、不确定性和危害性;李静等(2008)就环境污染事件发生的影响因素进行了一定的相关性分析,认为环境污染事件发生与人口数、GDP总量、企业个数和工业废水量4个因素呈显著正相关关系。但事实上,环境污染事故的诱发因素是多样和复杂的,不是单一的经济发

展因素所能解释的,它既与经济快速发展过程中企业的排污风险载荷相关,也与环境污染监管不力、执法不严、控制反应不及时、风险防范意识不强等人为因素相关,还与环境风险监控设施不完备等技术因素及不确定的外界干扰因素有关。基于此,本文选取上述4个方面共12个指标:①经济水平指标。包括人均GDP、工业企业个数、第二产业产值;②污染排放指标。包括工业废水达标排放量、工业废气达标排放量、工业固体废弃物综合利用量;③环境监管指标。包括环保机构总数、年末实有环保系统人数、环境来信来访次数;④环境控制指标。包括环境污染治理投入、环境法规和地方规章总数、人大政协的环境提案数等,用SPSS软件进行Sperman's相关分析,结果见表3。

结合李静等(2008)对中国1993-2005年的环境污染事件影响因素分析结果,比较可以发现,在本文的1995-2012年的研究时间尺度内,环境污染事件的影响因素有着较大的变化和不同。首先,环境污染事件发生与人均GDP、第二产业增加值、环境污染治理投入表现出显著的负相关关系,即随着工业文明的加快、经济水平的显著提高、环境污染治理能力的提升,环境污染事件有着明显的控制和减少;其次,工业企业个数与环境污染事件发生次数无显著相关关系,并未如李静等(2008)研究认为的“越多的工业企业数量可以诱发更多的环境事故的正相关性”;企业对环境污染事件的影响主要表现在部分企业设备老化、企业管理不善和员工的操作失误等造成企业突然外排有害物质而引发。这表

表3 环境污染事件发生次数(全国总次数)与外部影响因素的相关性分析

Tab.3 Correlation analysis between environmental pollution incidents and external factors

主驱动力	载荷因素	全部环境污染事件	水污染事件	大气污染事件	固废污染事件
污染物排放水平	工业废水达标排放量	-0.695**	-0.653**	—	—
	工业废气达标排放量	-0.712**	—	-0.706**	—
	工业固废综合利用量	-0.738**	—	—	-0.408
经济发展水平	人均GDP	-0.801**	-0.735**	-0.794**	-0.396
	工业企业数量	-0.294	-0.510**	-0.216	-0.328
	第二产业增加值	-0.801**	-0.735**	-0.794**	-0.396
环境监管水平	环保机构总数	-0.684**	-0.623**	-0.680**	-0.205
	年末实有环保系统人数	-0.801**	-0.735**	-0.794**	-0.396
	环境来信、来访次数	-0.462	-0.286	-0.453	-0.266
环境控制水平	环境污染治理投入	-0.808**	-0.737**	-0.796**	-0.405
	环境法规或规章总数	0.871**	0.832**	0.861**	0.514*
	人大、政协的环境提案	-0.528*	-0.434	-0.531*	-0.120

注:**表示 $p < 0.01$, *表示 $p < 0.05$,相关性显著(双尾 t 检验)。

明,2005年以后企业的环境污染风险控制能力在增强,进入有序管理状态;再次,环境污染物的达标排放量与环境污染事件的发生次数呈现负相关关系。这意味着若污染物排放得到合理处理和达标控制后再排放,一定程度上可以降低事故发生的可能性,这从2005年后突发性环境污染事件的急剧减少得到有力佐证,也表明从全局来看,污染物排放量本身并不意味着事件发生的必然性。

此外,环保机构,环保人数,人大、政协的环境提案数与环境污染事件亦呈现负相关关系,说明随着环保监管队伍的完善、政府宏观调控能力的加强,环境污染事件可以得到较为有效控制;而环境法律和地方法规的出台数量与环境污染事件发生次数呈正相关关系,说明随着污染事件次数的增多,各地区环境立法和保障体系建设也在增强,伴随着法律体系、法规制度的完善,环境污染事件的总次数得到有效控制,相对应的法律和法规出台数量则趋于减少,更多地重视法规的执行和落实。如2006年出台的《国家突发环境事件应急预案》以及同年国家环保总局对全国化工石化建设开展的环境风险大排查,加强了对环境污染事故的风险应急管理,并适时采取众多相应的预防措施以减少环境事故的发生频次,并在2007年后取得了较为显著的控制效果。

4.2 局域的环境污染事件发生影响因素

为进一步探究局域环境污染事件的发生机制,本文利用空间面板计量模型进行检验。从3.2.2小

节的分析可知,环境污染事件在2001年后开始出现空间集聚效应,因此选取2001-2012年的事件数据进行空间面板计量分析;同时,基于4.1小节的分析及考虑到数据的连续性和完整性,本文具体选取反映经济水平的人均GDP(AGDP)和第二产业增加值(SI)、反映环境监管水平的环保机构数(EPA)和实有环保系统人数(EW)、及反映环境控制能力的环境污染治理投入(EPCI)等5个指标进行分析,具体计算过程在Matlab2010a中实现,结果见表4。

由表4得出,①人均GDP、第二产业增加值、环保机构数量及环境污染治理投入等4个指标对环境污染事件的发生均有一定的影响,但不同的模型中表现并不一致,有的未通过显著性检验;②空间效应($W*dep.var, spat.aut.$)在4个模型中与环境污染事件的发生有着显著的影响(1%的水平上显著),且系数为正,说明某区域的环境污染事件发生会对相邻地区的污染事故发生带来正向的影响。为进一步理解不同变量的不同作用,对影响环境污染事件发生次数的影响因素及作用机制进行详细分析:

(1) 经济发展水平与环境污染事件

人均GDP在固定效应模型中对环境污染事件发生的影响显著(t 值分别为2.2137和1.9814),系数为正,说明经济发展水平较高的地区(如上海、浙江、江苏、山东、湖南、四川等HH地区)会面临相对较高的环境污染事件发生频次和压力;经济较为落后的省区(如西藏、青海、宁夏、新疆等西部地区LL地区)环境污染事件发生频次可能相对较少,这与

表4 中国环境污染事件发生的影响因素的空间面板模型估计结果

Tab.4 Spatial panel model estimate results for the influencing factors of China's environmental pollution incidents

变量	Sar-Panel-FE		Sar-Panel-RE		Sem-Panel-FE		Sem-Panel-RE	
	系数	t 值	系数	t 值	系数	t 值	系数	t 值
<i>intercept</i>	—		20.763443	1.5548			32.614146	2.1650**
<i>AGDP</i>	0.000793	2.2137**	0.000319	1.0028	0.000864	1.9814**	0.000086	0.2393
<i>SI</i>	-0.005093	-3.3013***	-0.003425	-2.5099**	-0.006213	-3.6951***	-0.003292	-2.2059**
<i>EPA</i>	-0.100170	-2.1890*	-0.006532	-0.1875	-0.175791	-3.8935***	-0.022315	-0.6246
<i>EW</i>	0.004680	1.0150	0.003033	1.3131	0.007079	1.5197	0.003913	1.4932
<i>EPCI</i>	-0.000085	-2.5082*	-0.000060	-1.7833*	-0.000064	-1.7492*	-0.000058	-1.578120
<i>W*dep.var</i>	0.397992	6.4315***	0.399966	6.4559***	—		—	
<i>spat.aut.</i>	—		—		0.470981	8.0239***	0.417684	6.4565***
R^2	0.5524		0.4991		0.4604		0.4961	
<i>corr-squared</i>	0.1200		0.0092		0.0927		0.0066	
Hausman 检验	—		-8.7936		—		-13.2997**	
LR 检验	207.4469***		101.7929***		212.878***		97.3890***	
<i>log-likelihood</i>	-1749.347		-1802.174		-1746.632		-1804.376	

注:***表示 $p < 0.01$,**表示 $p < 0.05$,*表示 $p < 0.1$ 。

图3结果相一致。但总的来看,经济发展水平的提高会减少环境污染事件的总频次,即环境污染事件发生次数并未与经济发展完全同步变化,会有一些的地区差异。杨洁等(2010)研究亦表明,环境污染事件的发生与经济发展水平的关系,呈现倒“N”型波浪式曲线特征,污染事件的发生频次会有反复的过程,在局部地区还会有增多和集聚。近年来长三角地区的空间集聚态势亦说明经济对污染事件的控制不是必然的结果,上海在2000年以后的环境污染事件次数有明显上升的趋势,一方面与上海及周边地区布局有大量的传统重化工企业有密切关系,环境风险系数较大(薛鹏丽等, 2011);另一方面,长三角地区受台风、暴雨等自然灾害的影响较大,对自然灾害、交通事故等不确定因素的防范需重视。

同时,第二产业增加值在4个模型中均有显著影响,系数为负,说明工业水平较高的地区(典型的如广东、天津、北京等地区),随着工业技术的革新和污染排放的有效控制,环境污染事件会逐渐减少。而在某些工业发展迅速,但产业布局或结构不合理、总体工业水平偏弱的省区(典型的如广西、云南、陕西等)则会有一定的环境污染事件高发期。

(2) 环境监管、控制水平与环境污染事件

各地区环境机构数在固定效应模型在对环境污染事件发生的影响显著,且系数为负,说明加强环保机构的建设,加大环境的执法力度可以减少环境污染事件的发生;而环保系统人员数量在4个模型中均未通过显著性检验,说明环保人员数量对环境污染事件发生频次的影响不太明显,这可能也意味着环保机构建设本身比人员数量的增加对环境污染事件的发生更有控制意义。各地环保及环境监测机构可通过加强环境风险的监测、监督和预防,制定并完善突发性环境污染事件应急预案,健全环境应急指挥系统、配备应急装备和监测仪器等措施,最大限度地减少环境事件发生的频次、减轻事故造成的环境及社会经济危害。

环境污染治理投入在固定效应模型和空间滞后随机模型(t 值分别为-2.5082, -1.7492和-1.7833)中,与环境污染事件的发生存在着显著的关系($p < 0.1$),且系数为负值,说明环境污染治理投资在环境污染事故频次降低中起着一定作用,与杨洁等(2013)研究结果基本一致。虽然不同时期环境污染治理投资的方向和侧重点有所不同,但今后持续在控制环境污染事故方面进行投资是非常有必要的。

(3) 空间效应与环境污染事件

空间效应在4个模型中对环境污染事件的发生都有显著影响,且系数为正,并且比其他的变量值要大许多,说明空间效应是环境污染事故发生的一个重要的因素。它主要体现在两个方面:一是“空间邻近效应”。现实中,如果某省区周边省区的环境污染事件发生频次高,那么该省区面临的环境风险也会越大,污染物的跨界扩散流动(大气、水),会使得区域的环境污染事件发生趋同,如区域性的大气污染事件、雾霾等共同影响;2013年的上海松江死猪事件,与来自黄浦江上游的浙江嘉兴死猪有直接联系;更为典型的2005年松花江跨界水污染事故引起吉林、黑龙江两省的共同污染并带来跨国污染的国际纠纷。二是“空间溢出效应”。区域经济活动联系的加强、产业(企业)的布局转移、交通运输的连接,会使得污染事故的区域溢出转移。肖晓琴等(2008)对中国近年重大环境污染事故的成因分析中发现,38%的事故与环境危险源的转移和交通事故引发有关;Yu等(2009)研究亦表明中国的环境污染事件有16%归属于交通事故,如2004年广西北流清湾交通事故引发的苯泄露事件,造成跨省的广东茂名、湛江水体的严重污染;2005年3月29日在京沪高速公路交通事故引发的液氯泄露事件,山东载货的槽罐车带来江苏淮安公路周边居民的重大人员伤亡;2011年6月浙江杭州建德市灌装车泄漏引发的苯酚污染邻近的新安江水污染事件等。显然,邻近的地理单元、经济活动联系紧密的区域,其受交通事故、危险源转移等带来的溢出效应会更明显。

5 结论与讨论

(1) 1995-2012年,环境污染事件的总体变化呈先动态增长后逐渐下降的趋势,水污染和大气污染事件是主要事故类型。环境污染事件发生的高频风险区域亦在逐渐减少,但东南沿海及四川、湖南等中西部区仍有局部集聚的态势。全局Moran's I 指数表明,1995-2000年中国的环境污染事件呈随机分布状态,2001年后则开始呈现集聚的特征;Moran散点图表明局部的空间集聚先增强后减弱,环境污染事件近年来集中于泛长三角地区,高高地区为江浙沪。

(2) 空间重心转移曲线表明,环境污染事件的转移方向主要为西南和东北,两个快速转移时期分

别为 1998-2001 和 2004-2007 年, 这两阶段分别对应于中国西部大开发战略及中部崛起战略实施时期, 以及东部沿海高速经济发展的高能耗工业化阶段; 环境污染事件的发生可能与区域的产业转移和高负荷的污染排放压力有关。

(3) 环境污染事件的发生有别于环境污染物的排放, 不是社会经济发展过程中的必然产物, 并受多种因素的综合作用, 主要与外在突发性因素、污染物的达标排放和控制、经济发展阶段及环境治理投入、环境监管能力和空间效应等因素有关。其中, 空间效应是环境污染事故发生的一个重要因素, 主要体现在空间邻近效应和空间溢出效应两方面。未来中国环境污染事件的控制不仅要提高污染风险的控制(应急)能力、污染源的治理投入水平, 还要提高环境污染的监管和执法能力、建立严格的制度保障和社会监督、开展环境污染隐患的全面排查工作。此外, 还需加强环境污染事故的区域联防联控, 制定若干跨界污染事故的应急响应联动机制及环境污染区域联防联控机制, 泛长三角、泛珠三角等高频风险地区可率先进行探索, 建立跨省市县的三级污染事件防控应急制度, 将环境风险的不确定因素和环境损失降到最低。

本文从宏观角度对中国突发性环境污染事件的区域空间特征和影响机制进行了阐述, 未来的研究可以有针对性地围绕水污染事件、大气环境事件、危险废物事件等更加深入探讨其事故发生的时空作用机制, 并在流域尺度和跨行政单元的多层级尺度建立事故分区预防机制和应急联动管理机制。

参考文献(References)

范小杉, 罗宏. 2012. 中国突发环境事件时间序列分析[J]. 中国环境管理, (4): 11-16. [Fan X S, Luo H. 2012. Time series analysis on suddenly happened environmental accident in China[J]. China Environmental Management, (4): 11-16.]

高超, 金凤君, 傅娟, 等. 2013. 1996-2011 年南非人口空间分布格局与演变特征[J]. 地理科学进展, 32(7): 1167-1176. [Gao C, Jin F J, Fu J, et al. 2013. Spatial pattern of population and its evolution in South Africa during 1996-2011[J]. Progress in Geography, 32(7): 1167-1176.]

韩素芹, 蔡旭晖, 李培彦, 等. 2009. 天津市突发事故条件下大气污染的应急模拟[J]. 中国环境科学, 29(9): 919-923. [Han S Q, Cai X H, Li P Y, et al. 2009. Numerical simulation of emergency response to atmospheric pollution acci-

dent in Tianjin[J]. China Environmental Science, 29(9): 919-923.]

匡文慧, 张树文, 张养贞, 等. 2005. 1900 年以来长春市土地利用空间扩张机理分析[J]. 地理学报, 60(5): 841-850. [Kuang W H, Zhang S W, Zhang Y Z, et al. 2005. Analysis of urban land utilization spatial expansion mechanism in Changchun City since 1900[J]. Acta Geographica Sinica, 60(5): 841-850.]

李光强, 曾绍琴, 邓敏, 等. 2013. 重心转移曲线在时空演化模式表达中的应用[J]. 武汉大学学报: 信息科学版, 38(8): 940-944. [Li G Q, Zeng S Q, Deng M, et al. 2013. Employing a centriod transferring curve to spatio-temporal evolution patterns[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 38(8): 940-944.]

李静, 吕永龙, 贺桂珍, 等. 2008. 我国突发性环境污染事故时空格局及影响研究[J]. 环境科学, 29(9): 2684-2688. [Li J, Lv Y L, He G Z, et al. 2008. Spatial and temporal changes of emerging environmental pollution accidents and impact factors in China[J]. Environmental Science, 29(9): 2684-2688.]

李瑞, 吴殿宇, 鲍捷, 等. 2013. 高级科学人才集聚成长的时空格局演化及其驱动机制: 基于中国科学院院士的典型分析[J]. 地理科学进展, 32(7): 1124-1138. [Li R, Wu D Y, Bao J, et al. 2013. Evolution of temporal and spatial pattern and driving mechanisms of agglomerative growth of senior science talents: a case study of academicians of CAS[J]. Progress in Geography, 32(7): 1124-1138.]

王晓, 郝芳华, 程红光, 等. 2008. 复杂地形高含硫输气管道环境风险事故模拟[J]. 中国环境科学, 28(1): 78-82. [Wang X, Hao F H, Cheng H G, et al. 2008. Simulation of environmental risk accident of high sulfur-content gas pipeline in complex terrain[J]. China Environmental Science, 28(1): 78-82.]

肖晓琴, 肖云. 2008. 我国近年重大环境污染事故归因分析[J]. 江西化工, (2): 43-46. [Xiao X Q, Xiao Y. 2008. Attribute analysis to serious environmental pollution of our country in recent years[J]. Jiangxi Chemical Industry, (2): 43-46.]

薛鹏丽, 曾维华. 2011. 上海市突发环境污染事故风险区划[J]. 中国环境科学, 31(10): 1743-1750. [Xue P L, Zeng W H. 2011. Shanghai environmental accidents risk regionalization[J]. China Environmental Science, 31(10): 1743-1750.]

杨洁, 毕军, 张海燕, 等. 2010. 中国环境污染事故发生与经济发展的动态关系[J]. 中国环境科学, 30(4): 571-576. [Yang J, Bi J, Zhang H Y, et al. 2010. Evolvement of the relationship between environmental pollution accident

- and economic growth in China[J]. *China Environmental Science*, 30(4): 571-576.]
- 杨洁, 黄蕾, 李凤英, 等. 2013. 中国 1991-2010 年环境污染事故频数动态变化因素分解[J]. *中国环境科学*, 33(5): 931-937. [Yang J, Huang L, Li F Y, et al. 2013. Decomposition analysis on the variation of China's annual environmental pollution accidents, 1991-2010[J]. *China Environmental Science*, 33(5): 931-937.]
- 杨万江, 陈文佳. 2011. 中国水稻生产空间布局变迁及影响因素分析[J]. *经济地理*, 31(12): 2086-2093. [Yang W J, Chen W J. 2011. Studies on the spatial distribution changing of China's rice production and its influencing factors [J]. *Economic Geography*, 31(12): 2086-2093.]
- 杨小林, 李义玲. 2014. 长江流域跨界水污染事故应急响应联动机制[J]. *水资源保护*, 30(2): 78-81. [Yang X L, Li Y L. 2014. Cooperating mechanism of emergency response to cross-boundary water pollution accidents in Yangtze River Basin[J]. *Water Resources Protection*, 30(2): 78-81.]
- 杨娅, 马俊伟, 刘仁志. 2012. 上海市突发性环境事件时空格局及影响因素分析[J]. *中国人口·资源与环境*, 22(5): 105-109. [Yang Y, Ma J W, Liu R Z. 2012. Incidents and its causative factors in Shanghai[J]. *China Population, Resources and Environment*, 22(5): 105-109.]
- 杨振山, 蔡建明. 2010. 空间统计学进展及其在经济地理研究中的应用[J]. *地理科学进展*, 29(6): 757-768. [Yang Z S, Cai J M. 2010. Progress of spatial statistics and its application in economic geography[J]. *Progress in Geography*, 29(6): 757-768.]
- 周扬, 李宁, 吴文祥, 等. 2014. 1982-2010 年中国县域经济发展时空格局演变[J]. *地理科学进展*, 33(1): 102-113. [Zhou Y, Li N, Wu W X, et al. 2014. Evolution of spatial-temporal pattern of county economic development in China during 1982-2010[J]. *Progress in Geography*, 33(1): 102-113.]
- Anselin L. 1988. *Spatial econometrics: methods and models* [M]. Dordrecht, Netherlands: Kluwer Academic Publishers.
- Elhorst J P. 2010. *Spatial Panel Data Models*[M]//Fischer M M, Getis A. *Handbook of applied spatial analysis*. Berlin, Germany: Springer: 377-407.
- Gong J X. 2002. Clarifying the standard deviational ellipse[J]. *Geographical Analysis*, 34(2): 155-167.
- He G Z, Zhang L, Lu Y L, et al. 2011. Managing major chemical accidents in China: towards effective risk information [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 187(1-3):171-181.
- Hsueh Y H, Lee J, Beltz L. 2012. Spatio-temporal patterns of dengue fever cases in Kaohsiung City, Taiwan, 2003-2008 [J]. *Applied Geography*, 34(2): 587-594.
- Lee B C, Jeong J H, Na M G, et al. 2006. Effects of accident management strategy on the severe accident environmental conditions[J]. *Annals of Nuclear Energy*, 33(1): 13-21.
- Lennox S D, Foy R H, Smith R V, et al. 1998. A comparison of agricultural water pollution incidents in Northern Ireland with those in England and Wales[J]. *Water Research*, 32(3): 649-656.
- Mohd R S, Charles J W, David S, et al. 2014. Environmental risk analysis of hazardous material rail transportation[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 264(2-3): 560-569.
- Tobler W. 1970. A computer movie simulation urban growth in the Detroit region[J]. *Economic Geography*, 46(2): 234-240.
- Wiens J A, Parker K R. 1995. Analyzing the effects of accidental environmental impacts: approaches and assumptions [J]. *Ecological Applications*, 5(4):1069-1083.
- Wirtz K W, Baumberger N, Adam S, et al. 2007. Oil spill impact minimization under uncertainty: evaluating contingency simulations of the Prestige accident[J]. *Ecological Economics*, 61(2-3):417-428.
- Wong D W S. 1999. Several fundamentals in implementing spatial statistics in GIS: using centographic measures as examples[J]. *Geographic Information Sciences*, 5(2): 163-173.
- Xue P L, Zeng W H. 2011. Trends of environmental accidents and impact factors in China[J]. *Frontiers Environmental Science & Engineering in China*, 5(2) : 266-276.
- Yu H, Zhang T Z. 2009. Evaluation of major polluting accidents in China: results and perspectives[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 168(2-3): 670-673.
- Zeng W H, Cheng S T. 2005. Risk forecasting and evaluating model of environmental pollution accident[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 17(2): 263-267.
- Zhu Y G, Wang L, Wang J Z, et al. 2007. China steps up its efforts in research and development to combat environmental pollution[J]. *Environmental Pollution*, 147(2): 301-302.

Spatiotemporal variability of sudden environmental pollution incidents and influencing factors in China, 1995–2012

DING Lei¹, HUANG Yalin², LIU Yunlang¹, LIU Chao², CHENG Shenggao^{*}

(1. School of Environmental Studies, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China;

2. School of Public Administration, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China)

Abstract: Understanding the complexity of spatiotemporal variations of sudden environmental pollution incidents and quantifying the contribution of their driving factors are important for effective environmental management in China. In this study, we analyzed the spatiotemporal patterns of sudden environmental pollution incidents and influencing factors in China for the period of 1995-2012 based on the Exploratory Spatial Data Analysis (ESDA) and Spatial Econometric Panel Model. The results indicate that: the frequency of environmental pollution incidents was gradually declining after the initial fluctuating growth and the high-frequency areas were mainly concentrated in eastern and southwestern China; ESDA analysis revealed that China's environmental pollution incidents were random distributed from 1995 to 2000 and agglomerated after 2001; in recent years the high-frequency area focused on the Pan-Yangtze River Delta region; the high-frequency center moved rapidly in 1998-2001 and 2004-2007 as a consequence of the regional industrial transfer and high pollution discharge pressure, toward southwest and northeast. Environmental pollution incident was different from pollutant emissions and is not an inevitable outcome of economic development. It is mainly related to the level of pollution control, government environmental supervision ability, spatial effect, and other factors. As one of the most important factors influencing environmental pollution incidents, spatial effect mainly included the spatial proximity effect and spillover effect. In order to control environmental pollution incidents effectively, the government should formulate joint transboundary pollution incidents emergency response mechanisms within regions based on regional pollution diffusion and transfer.

Key words: sudden environmental pollution incidents; ESDA; temporal and spatial evolution characteristics; spatial effect; China