

地理科学  
*Scientia Geographica Sinica*  
ISSN 1000-0690, CN 22-1124/P

## 《地理科学》网络首发论文

题目: 基于多尺度的中国环境污染事件时空分布及其影响因素  
作者: 赵雪雁, 王蓉, 王晓琪, 刘江华  
收稿日期: 2018-10-11  
网络首发日期: 2019-09-26  
引用格式: 赵雪雁, 王蓉, 王晓琪, 刘江华. 基于多尺度的中国环境污染事件时空分布及其影响因素[J/OL]. 地理科学.  
<http://kns.cnki.net/kcms/detail/22.1124.P.20190925.1754.004.html>



**网络首发:** 在编辑部工作流程中, 稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定, 且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式(包括网络呈现版式)排版后的稿件, 可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定; 学术研究成果具有创新性、科学性和先进性, 符合编辑部对刊文的录用要求, 不存在学术不端行为及其他侵权行为; 稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准, 正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性, 录用定稿一经发布, 不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容, 只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

**出版确认:** 纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊(光盘版)》电子杂志社有限公司签约, 在《中国学术期刊(网络版)》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版, 以单篇或整期出版形式, 在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊(网络版)》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物(ISSN 2096-4188, CN 11-6037/Z), 所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

# 基于多尺度的中国环境污染事件 时空分布及其影响因素

赵雪雁,王蓉,王晓琪,刘江华

(西北师范大学地理与环境科学学院,甘肃 兰州 730070)

**摘要:**环境污染事件已成为人类社会面临的严峻挑战,严重制约着人类社会的可持续发展,当前急需厘清环境污染事件的时空特征及影响因素,为制定有效的环保政策提供借鉴。利用Theil指数、变异系数、ESDA等方法,分析了2006~2016年中国环境污染事件的时空分布特征,并借助地理探测器识别了不同尺度环境污染事件的影响因素。结果表明:① 2006~2016年省级尺度环境污染事件发生总频次与不同等级环境污染事件发生频次均呈波动下降趋势,其发生频次和区域差异呈“东-中-西”洼地型格局;② 地级市尺度环境污染事件发生频次随城市规模减小有所降低,随经济发展水平降低呈倒U型,同时,环保重点城市污染事件发生频次高于普通城市的特征;而环境污染事件的差异性表现为随城市规模减小有所降低,随经济发展水平降低而递减,及环保重点城市高于普通城市的特征。③ “胡焕庸线”以东地区环境污染事件多发且类型多样,以西地区污染事件少发且类型单一,不同等级环境污染事件的空间分布差异较大;④ 环境污染事件的影响因素存在差异,且随尺度增大,影响因素与环境污染事件的关联性趋于增强。其中,经济发展和环境监管水平对不同尺度环境污染事件均有显著影响,环境监管水平与其他因素的交互作用对不同尺度环境污染事件的解释力较高。

**关键词:**环境污染事件;区域差异;地理探测器;中国

**中图分类号:**X507 **文献标识码:**A

20世纪以来,全球各类环境污染事件频发,给区域发展及公众健康带来巨大威胁,并成为影响各国可持续发展的重要难题。1956年日本水俣事件导致1408人死亡<sup>[1]</sup>,2005年松花江水污染事件,使数百万居民遭受严重影响<sup>[2]</sup>。联合国环境署指出全球每年仍有80%的废水未经处理排入环境,1300万t塑料垃圾流入海洋<sup>[3]</sup>。鉴于此,联合国环境署制定了“战胜污染”计划,呼吁各国采取行动,打造“零污染地球”<sup>[4]</sup>;SDG2030也明确提出要“减少污染,消除倾倒废物现象,把危险化学品和材料的排放减少到最低限度,将未经处理废水比例减半”<sup>[4]</sup>。改革开放后,中国经济在快速增长的同时,环境问题日益突出,环境污染事件成为最严重的

环境问题之一<sup>[5]</sup>。全球污染最严重的20个城市中,中国占到16个,发达国家上百年工业化进程中出现的环境问题在中国都已集中出现,污染事件造成的年均损失占GDP比重在10%左右,既对社会稳定及公众健康构成威胁,又严重阻碍了生态文明建设进程<sup>[6-9]</sup>。鉴于此,国家“十三五”规划纲要明确指出“要加大环境治理力度,实行最严格的环境保护制度”<sup>[10]</sup>;十九大报告更提出要践行“绿水青山就是金山银山”的理念,深入开展大气、水、土壤污染防治行动。

近年来,环境污染事件研究引起国内外学者的广泛关注。国外研究主要集中在污染事件的时空特征分析<sup>[5,10,11]</sup>、污染源解析<sup>[5,12]</sup>、发生机理探究<sup>[11,12]</sup>

**收稿日期:**2018-10-11;**修订日期:**2019-01-15

**基金项目:**中国科学院A类战略性先导科技专项(XDA19040502)、国家自然科学基金项目(41971268,41661115)、中国科学院内陆河流域生态水文重点实验室开放基金项目(KLEIRB-2S-16-03)资助。[Foundation: Category of Strategic Priority Research Program of Chinese Academy of Sciences (XDA19040502), National Natural Sciences Foundation of China (41971268,41661115), Key Laboratory of Ecohydrology of Inland River Basin, Chinese Academy of Sciences (KLEIRB-2S-16-03).]

**作者简介:**赵雪雁(1971-),女,甘肃武都人,教授,主要从事生态经济研究。E-mail:zhaoxy@nwnu.edu.cn

网络出版时间:

网络出版地址:

及危害评估<sup>[13]</sup>等方面。例如,Shin等<sup>[11]</sup>指出50%以上的污染事件是人为导致;Smith等<sup>[13]</sup>指出随着空气污染程度加重,居民哮喘发病率呈上升趋势。国内研究聚焦于环境污染事件的时空格局分析<sup>[9,14]</sup>、环境污染事件与经济发展关系探究<sup>[15]</sup>、风险区划<sup>[16]</sup>及影响因素识别<sup>[15,17]</sup>等方面。例如,李静等<sup>[9]</sup>发现中国环境污染事件数趋于降低,且集中分布于中东部地区;杨洁等<sup>[15]</sup>指出环境污染事件与经济增长呈倒“N”型关系;丁镭等<sup>[17]</sup>发现经济发展水平、环境治理投入及环境监管能力对环境污染事件影响较大。总体来看,已有研究多关注环境污染事件的污染源及造成的影响,虽有研究开展了环境污染事件的时空分布研究,但多关注单一尺度(如省域、城市尺度),较少从多尺度入手分析环境污染事件的时空格局,也较少考察不同尺度环境污染事件影响因子的关联性,难以全面反映环境污染事件的时空分异特征及成因。

环境污染事件严重制约着“美丽中国”战略的实施,降低环境污染事件发生频次已成为关系国家现代化进程和生态文明建设的当务之急。当前,亟需从多尺度出发分析环境污染事件的时空格局及影响因素,并寻求控制环境污染事件的对策。2006年作为中国“十一五”规划的开局之年,也是环境保护新阶段的开篇之年,国家将环境治理和保护提升至重要的战略地位。鉴于此,本文以2006~2016年为研究时段,2006年、2011年、2016年为研究节点,从省级-地级市尺度出发,利用变异系数、Theil指数、ESDA等方法分析环境污染事件的区域差异及时空分布特征,利用地理探测器探寻影响污染事件时空分异的关键因素,旨在为制定有效的环保政策提供借鉴。

## 1 数据来源与研究方法

### 1.1 数据来源

《国家突发环境事件应急预案(2014)》将环境污染事件定义为:“由于污染物排放或生产安全事故等,导致污染物等有毒有害物质进入大气、水体、土壤等环境介质,可能造成环境质量下降,危及公众健康和财产安全,带来环境破坏或重大社会影响的事件”。本文中省级环境污染事件发生频次数据来自2007~2017年《中国环境统计年鉴》<sup>[18]</sup>;地级市

污染事件频次数据来自2016年各省(自治区、直辖市)生态环境厅网站的环境污染事件信息及《安全与环境学报》网站(<http://www.aqyhjxb.com>)公开报道的中环境污染事件。省级年末人口数、GDP、环境污染治理投资占GDP比重等数据来自2007~2017年《中国统计年鉴》<sup>[19]</sup>及《中国环境年鉴》<sup>[20]</sup>;地级市数据来自2017年《中国城市统计年鉴》<sup>[21]</sup>、各省(自治区、直辖市)统计年鉴及2016年相应的国民经济和社会发展统计公报,个别缺失数据用插值法补齐。限于数据可得性,本研究未包括香港、澳门和台湾数据。

### 1.2 研究方法

#### 1.2.1 环境污染事件的区域差异测度

利用变异系数和Theil指数测度环境污染事件的区域差异,数值越高表明区域差异越大<sup>[22]</sup>。

#### 1.2.2 环境污染事件的时空分布测度

利用ESDA法全局Moran's *I*判断环境污染事件的空间分布特征,采用 $G_i^*$ 指数识别环境污染事件的空间依赖性和空间异质性<sup>[22]</sup>。

#### 1.2.3 环境污染事件时空分布的影响因素测度

利用地理探测器<sup>[23,24]</sup>中的因子探测和交互探测识别影响环境污染事件时空分异的关键因素。

## 2 结果分析

### 2.1 环境污染事件的区域差异

#### 2.1.1 省级尺度环境污染事件的区域差异

2006~2016年环境污染事件总体在波动中呈下降趋势,由2006年的842件降至2016年的304件,降幅为63.89%(图1)。其中,2006~2010年环境污染事件呈下降趋势,降幅为50.12%;2010~2013年环境污染事件有所上升,增幅为69.52%;2013~2016年环境污染事件呈下降态势,降幅为57.30%。“十一五”以来,随着《环境事件应对法》等法律的实施,致使环境污染事件发生频次显著降低<sup>[17]</sup>;2010年后因环境污染事件评价标准更为详实,使得2010~2013年环境污染事件有所增加;其后,国家大力推进水、土、气污染综合防治,并开展了环保税试点征收工作,因而环境污染事件明显减少。分地区来看,中西部地区<sup>①</sup>环境污染事件发生频次降幅较高,东部地区降幅较低,主要是由于与东部地区相比,中西部地区重工业和传统工业

① 东部地区包括京、津、冀、辽、沪、苏、浙、闽、鲁、粤、琼;中部地区包括晋、吉、黑、皖、赣、豫、鄂、湘;西部地区包括蒙、渝、川、黔、滇、藏、陕、甘、青、宁、新、桂<sup>[25]</sup>。

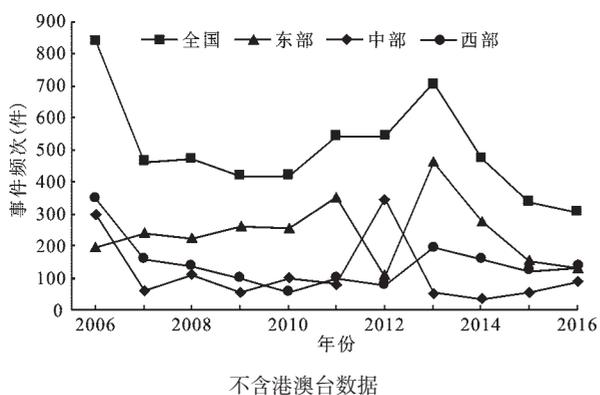


图1 中国环境污染事件的变化趋势

Fig.1 The change trend of environmental pollution incidents in China

分布较多,但大气、固废及其他污染事件治理成效较高,污染事件明显减少。

2006~2016年环境污染事件发生频次的区域差异在波动中呈缩小趋势,变异系数由1.32降至0.87, Theil指数由0.72降至0.45(图2)。环境污染事件发生频次的地带间与地带内差异均趋于缩小,其总体差异主要由地带间差异引起,平均贡献度达83.7%。地区间的差异演变存在较大差别,西部地区差异波动较和缓,中东部地区差异波动较急剧。总体来看,环境污染事件发生频次的区域差异大致呈“东-中-西”洼地型格局。

环境污染事件按严重程度分为一般事件、较大事件、重大事件和特大事件4类<sup>[8]</sup>。2006~2016年各类环境污染事件发生频次总体呈波动下降趋势,其中,较大事件年均降幅最高,一般事件最低(图3)。不同类型污染事件发生频次的降幅存在较大差异,相较于其他事件,较大事件在东、中、西部地区发生频次的年均降幅均最高,分别为16.40%、17.22%和17.82%,一般事件发生频次的

年均降幅在东部和西部地区最低,而重大事件在中部地区的降幅最低。总体来看,特大事件发生频次表现出“西-中-东”的倒马鞍型分布格局,重大和一般事件保持“东-中-西”的洼地型分布格局;较大事件保持“东-中-西”的阶梯式分布格局。进一步分析发现,特大事件主要发生在中西部地区,原因在于中西部主要以矿业、金属冶炼、化学工业等污染型产业为主,加之环境风险防范体系不健全、管理机制较松散,致使特大事件发生频次较高。

水污染事件是环境污染事件的重要类型,特以水污染事件为例来展示环境污染事件的变化趋势。2006~2016年水污染事件发生频次整体呈波动下降趋势(图4),由232件降至102件,原因在于2005年松花江重大水污染事件后,国家加大了对水污染的防控力度,颁布了《水污染防治法》等法律法规,致使水污染事件发生频次明显降低。不同地区水污染事件发生频次和变化趋势存在较大差异,中西部地区水污染事件发生频次明显下降,东部地区略有上升,原因在于东部人口密集、河网密布,工业企业数量较多,水污染事件发生频次较高<sup>[9]</sup>。总体来看,水污染事件发生频次呈“东-中-西”阶梯式递减格局。

### 2.1.2 地级市尺度环境污染事件的区域差异

2016年不同城市环境污染事件发生频次及差异性较大(表1)。依据2016年各地市市区人口数进行分类,划分为特大城市、大城市、中等城市和小城市4类<sup>[25]</sup>。从城市规模看,特大城市污染事件发生频次最高,中等城市最低。进一步分析发现,不同规模城市污染事件发生频次差异较大,其中,特大城市差异性最大,大城市次之,中等城市最小。总体来看,环境污染事件发生频次及差异性

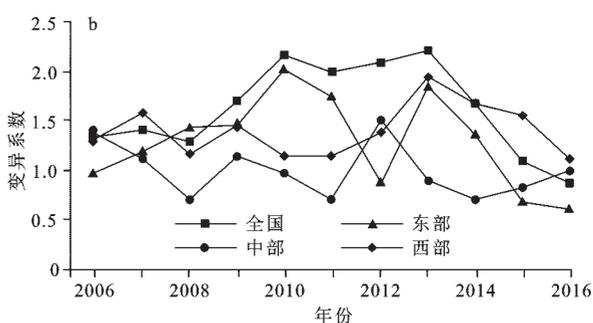
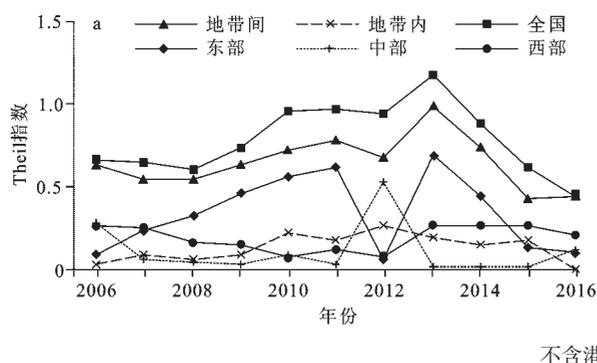
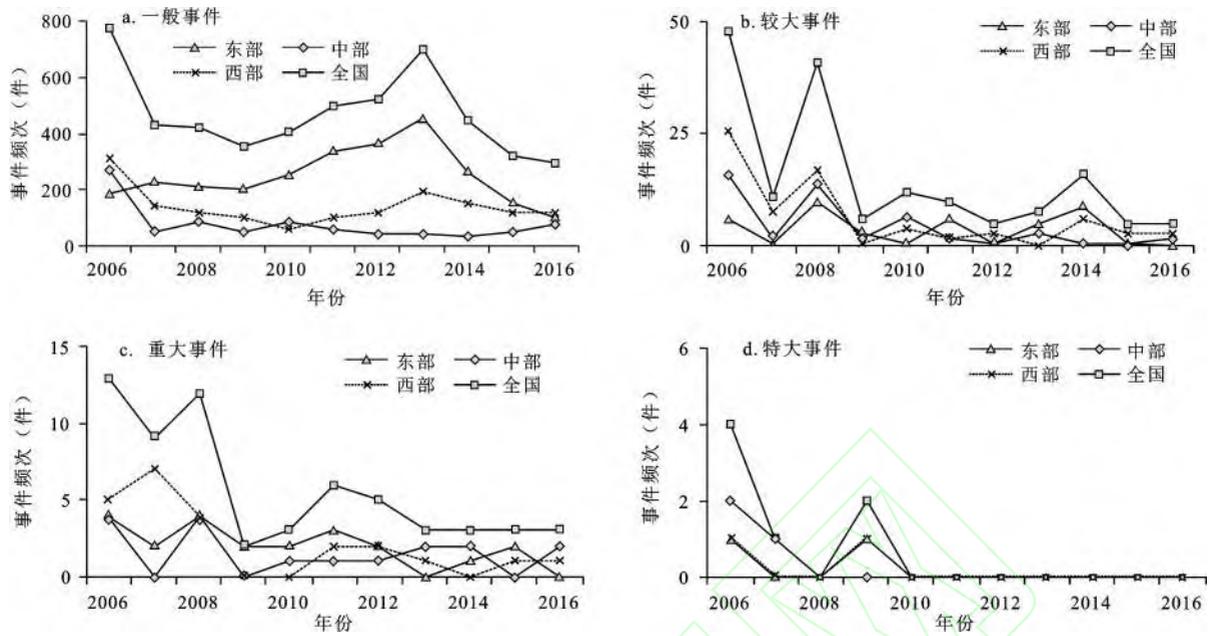


图2 中国环境污染事件的区域差异

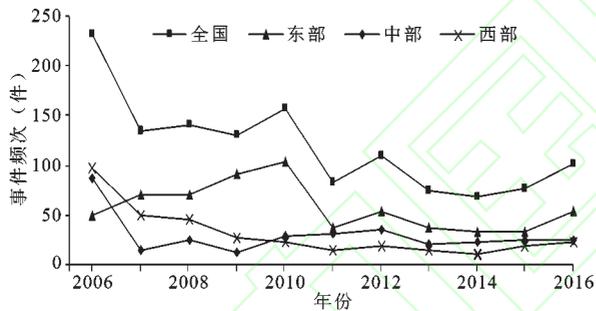
Fig.2 The regional differences of environmental pollution incidents in China



不含港澳台数据

图3 中国不同等级环境污染事件的变化趋势

Fig.3 The change trend of environmental pollution incidents in different levels in China



不含港澳台数据

图4 中国水污染事件的变化趋势

Fig.4 The change trend of water pollution incidents in China

均随城市规模的减小有所降低。依据2016年各地市人均GDP进行分类,按占全国平均水平的150%、100%和50%,划分为发达、较发达、欠发达和不发达城市4类<sup>[26]</sup>。从经济发展水平看,城市环

境污染事件发生频次表现为欠发达城市>较发达城市>发达城市>不发达城市的特征,其发生频次的差异性随城市经济发展水平的降低而下降。环保重点城市是国家环保总局2002年划定的污染防治重点城市,城市数量为113个<sup>[27]</sup>。从环保重点城市和普通城市看,环保重点城市污染事件发生频次和差异性均高于普通城市。

## 2.2 环境污染事件的时空分布

### 2.2.1 省级尺度环境污染事件的时空分布

本文以2006年、2011年和2016年为时间节点分析省级尺度环境污染事件的时空分布特征。首先,基于2011年省级尺度环境污染事件发生频次,利用自然断点法<sup>[22]</sup>划分为低频区( $\leq 4$ 件)、较低频区(5~11件)、中频区(12~18件)、较高频区(19~36件)和高频区( $\geq 37$ 件)5类;然后,将该标准应用于其他年份(图5)。总体来看,污染事件空间分布的

表1 中国不同城市类型环境污染事件的差异性

Table 1 The differences in environmental pollution incidents of different city types in China

差异性	城市规模				城市经济发展水平				环保城市和普通城市	
	特大城市	大城市	中等城市	小城市	发达城市	较发达城市	欠发达城市	不发达城市	环保重点城市	普通城市
污染事件比重(%)	29.71	25.88	19.41	25.00	28.82	30.29	32.35	8.53	56.76	43.24
变异系数	3.44	1.69	1.08	1.56	2.72	2.28	1.35	1.18	2.64	1.25
Theil指数	0.50	0.26	0.13	0.27	0.42	0.38	0.27	0.08	0.82	0.34

注: 不含港澳台数据。



不含港澳台数据  
图5 中国环境污染事件各频区的空间分布

Fig.5 Spatial distribution of frequency bands in environmental pollution incidents in China

变化较大,其中,① 2006~2011年高频区大幅收缩,由甘-陕-鄂-湘-桂-滇的“J”型分布转为仅在上海点状分布;较高频区向长江经济带外围跃迁分散,形成桂-粤和豫-苏-浙2个较高频连片区;较低频区明显扩张,连片分布格局增强;中频区略有扩张,且向北跃迁;低频区略有收缩,转为在西北地区连片分布;② 2011~2016年低频区大幅扩张,形成青-藏-滇-宁-蒙-黑-吉-冀-津-豫-皖2个低频连片区;较高频区明显收缩,仅在川、粤2省点状分布;中高频区略有扩张;较低频区数保持不变,但向西北跃迁。总体来看,2006~2016年环境污染事件以较低频区为主,“胡焕庸线”以西地区多为污染事件低频区,以东地区多为污染事件较低及以上频区;中东部地区由污染事件低频、较低频、较高频和高频区的均衡分布转为低频区为主,西部地区始终以低频区为主。

为进一步分析不同等级环境污染事件的时空分布特征,基于2011年省级尺度一般和较大事件发生频次,利用自然断点法<sup>[22]</sup>划分为一般事件低频区( $\leq 14$ 件)、中频区(15~36件)和高频区( $\geq 37$ 件)及较大事件低频区( $\leq 1$ 件)、中频区(2~3件)和高频区( $\geq 4$ 件)。由于重大和特大事件发生率较低,均不超过3件,因此用圆点进行标注。将该标准应用于其他年份。总体来看,一般和较大事件低频区大幅扩张,重大和特大事件分布区明显收缩(图6)。分时段来看:① 2006~2011年一般和较大事件低频区大幅扩张,两者高频区明显收缩。其中,一般事件高频区转为仅在上海点状分布,较大事件高频区转为在川、冀、浙3省点状分布,一般事件中频区数保持不变,分布趋于分散,

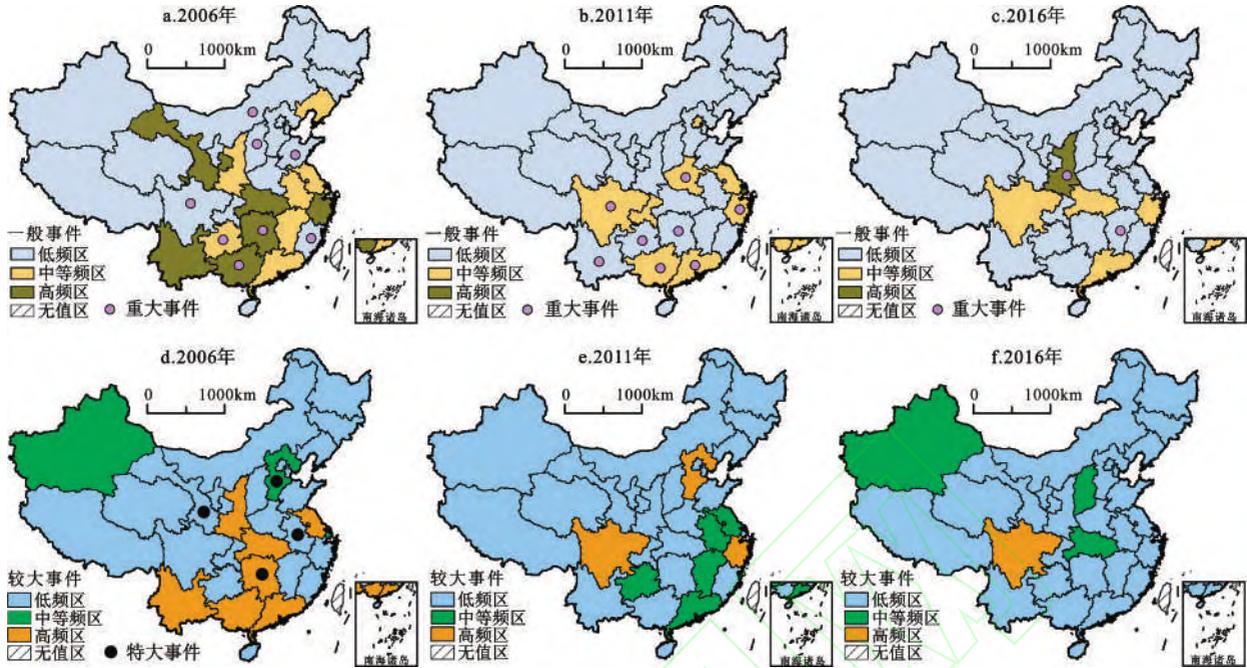
较大事件中频区明显扩张,重大事件分布区向南跃迁,特大事件转为无分布;② 2011~2016年一般和较大事件低频区大幅扩张,中频区明显收缩,前者中频区在川、鄂、浙、粤4省点状分布,后者中频区在新、晋、鄂3省点状分布,重大事件转为仅在安徽点状分布。

### 2.2.2 地级市尺度环境污染事件的时空分布

2016年为“十三五”环境保护顶层设计确定年,特以该年为节点分析地级市尺度环境污染事件的空间分布特征。基于该年地级市污染事件发生频次,利用自然断点法划分为低频城市( $< 1$ 件)、较低频城市(1~2件)、中频城市(3~5件)、较高频城市(6~10件)、高频城市( $\geq 11$ 件)5类<sup>[21]</sup>(图7)。从环境污染事件发生频次看,低频城市占比最高,较低频城市次之,高频城市最低;从环境污染事件空间分看,低频城市在中西部连片分布,中频及以上城市分布较分散,尤其是高频城市,仅在北京、重庆、西安3市点状分布。总体来看,地级市尺度环境污染事件的空间分布仍沿“胡焕庸线”一分为二,“胡焕庸线”以西地区多为低频城市,以东地区多为较低频及以上城市。

### 2.3 环境污染事件时空分布的影响因素

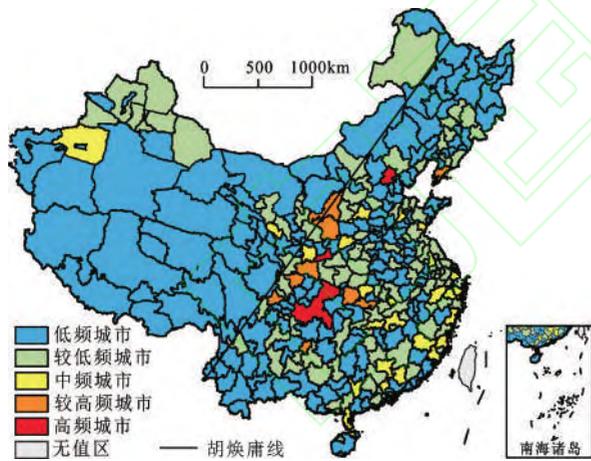
环境污染事件是多因素共同作用的结果,已有研究表明其受人口规模、城镇化水平、经济发展水平、工业化水平、环境监管等因素影响,且在不同时段和尺度,环境污染事件的影响因素可能存在显著差异<sup>[15,17,28,29]</sup>。通常,提高环境监管水平、加大污染治理力度可有效降低环境污染事件发生频次,在不同的城镇化与工业化阶段,城镇化水平与工业化水平对环境污染事件的影响存在差异<sup>[17]</sup>。



不含港澳台数据;重、特大事件发生频次较低,用圆点标注;a,b,c为2006年,2011年,2016年一般和重大事件;  
d为2006年较大和特大事件;e和f为2011年和2016年较大事件

图6 中国不同等级环境污染事件的空间分布

Fig.6 The spatial distribution of different environmental pollution incidents in China



不含港澳台数据

图7 中国地级市尺度环境污染事件的空间分布

Fig.7 The spatial distribution of city scales' environmental pollution incidents in China

鉴于此,本文从人口规模、城镇化水平、经济发展水平、工业化水平、环境治理水平等维度出发,分析影响环境污染事件分布的关键因素。用年末人口数( $x_1$ )表征人口规模;地区生产总值( $x_2$ )表征经济发展水平;城镇化率( $x_3$ )表征城镇化水平;工业增加值占GDP的比重( $x_4$ )和工业企业数( $x_5$ )表征

工业化水平;环保人员数( $x_6$ )和环保机构数( $x_7$ )表征环境监管水平;环境污染治理投资占GDP比重( $x_8$ )表征环境治理水平。

### 2.3.1 省级尺度环境污染事件时空分布影响因素

以2006年、2011年和2016年作为时间节点,利用地理探测器识别省级尺度上影响环境污染事件空间分布的关键因素。总体来看,不同时期各影响因子对环境污染事件解释力( $q$ 值)存在较大差异(表2)。经济发展水平对环境污染事件的解释力持续增强,环境监管水平的解释力呈波动上升趋势,环境治理水平及城镇化水平的解释力呈倒U型变化,人口规模的解释力持续降低。可见,经济发展水平、环境监管水平、环境治理水平等均影响着省级尺度环境污染事件的空间分布。分时段来看,2006年人口规模、工业化水平、环境监管及经济发展水平是影响环境污染事件空间分布的主导因子,其中,人口规模的解释力最强;2011年主导影响因子转为经济发展水平、环境监管和环境治理水平,其中,环境监管水平的解释力最强;2016年主导影响因子为经济发展水平和环境监管水平,其中,经济发展水平的解释力最强。

环境污染事件是多因子交互作用的结果,因

**表2 中国省级和地级市尺度影响因素对环境污染事件的解释力**

Table 2 The explanatory power of various influencing factors on environmental pollution incidents at the provincial and prefecture-level city scale in China

探测指标	省级			地级市
	2006年	2011年	2016年	2016年
年末人口数( $x_1$ )	0.59***	0.35	0.32	0.09**
GDP( $x_2$ )	0.38*	0.46**	0.55**	0.13***
城镇化率( $x_3$ )	0.20	0.28	0.17	0.06
工业增加值占GDP比重( $x_4$ )	0.40*	0.11	0.41	0.02
工业企业数( $x_5$ )	0.50**	0.23	0.28	0.06
环保人员数( $x_6$ )	0.40*	0.60***	0.46*	0.08*
环保机构数( $x_7$ )	0.35	0.32	0.37	0.09**
环境污染治理投资占GDP比重( $x_8$ )	0.21	0.38**	0.07	0.02

注:\*\*\*、\*\*和\*分别表示 $P$ 在0.01、0.05和0.10的水平上显著。不含港澳台数据。

此利用交互探测模块进一步分析因子间交互作用对污染事件解释力强弱的影。总体来看,各因子交互作用以非线性增强为主(表3)。其中,城镇化水平与人口规模、经济发展水平与工业化水平等的交互作用对环境污染事件的解释力明显增强,工业化水平与环境监管水平及城镇化水平交互作用的解释力趋于下降。分时段来看,2006年各因子的交互作用以双因子增强及非线性增强为主,其中,环境监管水平与其他因子交互作用的解

**表3 中国省级尺度环境污染事件影响因子间的交互作用**

Table 3 The interaction between influencing factors of environmental pollution events at provincial scale in China

2006年		2011年		2016年	
交互因子	作用值	交互因子	作用值	交互因子	作用值
$x_1 \cap x_2$	0.86	$x_1 \cap x_3$	0.90	$x_1 \cap x_2$	0.83
$x_2 \cap x_3$	0.73	$x_2 \cap x_3$	0.87	$x_2 \cap x_3$	0.89
$x_1 \cap x_4$	0.86	$x_3 \cap x_4$	0.89	$x_3 \cap x_5$	0.62
$x_2 \cap x_4$	0.80	$x_3 \cap x_5$	0.80	$x_4 \cap x_2$	0.93
$x_3 \cap x_4$	0.83	$x_6 \cap x_2$	0.86	$x_4 \cap x_3$	0.85
$x_3 \cap x_5$	0.90	$x_6 \cap x_3$	0.86	$x_5 \cap x_1$	0.84
$x_6 \cap x_4$	0.88	$x_6 \cap x_4$	0.87	$x_5 \cap x_2$	0.94
$x_6 \cap x_5$	0.88	$x_6 \cap x_7$	0.84	$x_6 \cap x_4$	0.80
$x_7 \cap x_1$	0.89	$x_7 \cap x_8$	0.83	$x_7 \cap x_4$	0.87
$x_7 \cap x_2$	0.98	$x_8 \cap x_2$	0.86	$x_7 \cap x_5$	0.85
$x_7 \cap x_3$	0.85	$x_8 \cap x_3$	0.85	$x_8 \cap x_4$	0.89
$x_7 \cap x_4$	0.88	$x_8 \cap x_5$	0.83	$x_8 \cap x_5$	0.91
$x_8 \cap x_6$	0.76	$x_8 \cap x_6$	0.94	$x_8 \cap x_6$	0.89

注:因篇幅限制,仅列举作用值较高的交互因子;不含港澳台数据。

释力明显强于其他因子间的交互作用,其与经济发展水平交互作用时解释力最高;2011年各因子的交互作用以非线性增强为主,其中,环境治理水平与其他因子交互作用的解释力较强,其与环境监管水平交互作用时解释力最高;2016年各因子的交互作用以非线性增强为主,其中,工业化水平、环境治理水平等其他因子的交互作用明显增强了对污染事件的解释力,且工业化水平与经济发展水平交互作用时解释力最高。

### 2.3.2 地级市尺度环境污染事件时空分布的影响因素

利用地理探测器识别影响2016年地级市尺度环境污染事件空间分布的关键因素(表2)。结果显示,经济发展水平、环境监管水平、人口规模对环境污染事件均有显著影响。其中,经济发展水平的解释力最强,人口规模的解释力最弱。可见,经济发展水平、环境监管水平和人口规模等均是影响地级市尺度环境污染事件空间分布的重要因素;交互探测结果显示(表4),地级市尺度各影响因子的交互作用以非线性增强为主。其中,环境治理水平与其他因子的交互作用对环境污染事件的解释力明显高于其他因子间的交互作用,当其与环境监管水平交互作用时解释力最高。可见,环境治理水平对地级市尺度环境污染事件的空间分布保持着重要影响。

**表4 中国地级市尺度环境污染事件影响因子间的交互作用**

Table 4 The interaction between influencing factors of environmental pollution events at prefecture-level scale in China

	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$	$x_5$	$x_6$	$x_7$
$x_2$	0.26						
$x_3$	0.33	0.31					
$x_4$	0.26	0.30	0.33				
$x_5$	0.26	0.24	0.23	0.28			
$x_6$	0.16	0.29	0.36	0.24	0.23		
$x_7$	0.17	0.29	0.31	0.30	0.25	0.23	
$x_8$	0.28	0.31	0.26	0.20	0.30	0.29	0.36

注:不含港澳台数据。

对比不同尺度环境污染事件空间分布影响因素的关联性,发现主要影响因素及解释力均存在较大差异<sup>[30]</sup>。经济发展水平和环境监管水平对2个尺度环境污染事件均有重要解释力,且在省级尺度的

解释力较强;交互探测结果显示,不同尺度影响因子的交互作用均以非线性增强为主,环境治理水平与其他因子交互作用的解释力较高,且其交互作用在省级尺度的解释力强于地级市尺度。

### 3 结论

环境污染已成为人类社会面临的严峻挑战,严重制约着人类社会可持续发展。本文通过分析2006~2016年中国环境污染事件发生频次的时空分布特征,利用地理探测器探明影响省级和地级市尺度环境污染事件的主要因素,得出以下结论:

1) 2006~2016年省级尺度环境污染事件频次和不同等级环境污染事件频次均呈波动下降趋势,其发生频次和区域差异性均呈“东-中-西”洼地型格局;水污染事件频次呈“东-中-西”阶梯式递减格局。

2) 地级市尺度环境污染事件发生频次表现为随城市规模减小有所降低,随经济发展水平降低呈倒U型变化,同时,环保重点城市污染事件发生频次高于普通城市的特征;而环境污染事件的差异性表现为随城市规模减小有所降低,随经济发展水平降低而递减,且环保重点城市高于普通城市的特征。

3) 环境污染事件的空间分布存在显著分异。“胡焕庸线”以东地区环境污染事件多发且类型多样,以西地区环境污染事件少发且类型单一;不同等级环境污染事件的空间分布存在显著分异,一般事件分布范围最大,特大事件分布范围最小。

4) 环境污染事件的影响因素存在差异,且随尺度增大,影响因素与环境污染事件的关联性趋于增强。其中,经济发展和环境监管水平对不同尺度环境污染事件有重要影响,环境监管水平与其他因素的交互作用对不同尺度环境污染事件的解释力均较高。

### 参考文献(References):

[1] 人民网.1956年日本水俣事件.[N/OL]. Japanese Minamata event in 1956. 2004-12-2. <http://www.people.com.cn/GB/huanbao/41909/42116/3082717.html>. [People.cn.Japanese Minamata event in 1956. 2004-12-27.<http://www.people.com.cn/GB/huanbao/41909/42116/3082717.html>.]

[2] 国际节能环保网.中国近年来最严重的十大环境污染事件[N/OL]. 2017-06-15. <http://huanbao.in-en.com/html/huanbao-2264659.shtml>. [Huanbao.in-en.com. Chinese top ten most serious envi-

ronmental pollution incidents in recent years. 2017-06-15.<http://huanbao.in-en.com/html/huanbao-2264659.shtml>.]

[3] 新华网.2018环保产业创新发展大会[N/OL].2018-06-07. <http://www.xinhuanet.com/live/0607CIEPEC/wzsl.htm>. [Xinhuanet. Environmental Industry innovation and development conference, 2018. 2018-06-07. <http://www.xinhuanet.com/live/0607CIEPEC/wzsl.htm>.]

[4] 联合国.水和环境-可持续发展[N/OL].<https://www.un.org/sustainabledevelopment/zh/water-and-sanitation/>.htm.2015-9-25. [United Nations. Water and the environment-sustainable development.<https://www.un.org/sustainabledevelopment/zh/water-and-sanitation/>.htm.2015-9-25.]

[5] Cao G Z, Yang L, Liu L X et al. Environmental incidents in China: lessons from 2006 to 2015[J].*Science of the Total Environment*, 2018, 633:1165-1172.

[6] 陆大道.中速增长:中国经济的可持续发展[J].*地理科学*, 2015, 35(10): 1207-1219. [Lu Dadao. Moderate-speed growth: sustainable development of China's economy. *Scientia Geographica Sinica*, 2015, 35(10): 1207-1219.]

[7] 王敏,黄滢.中国的环境污染与经济增长[J].*经济学(季刊)*, 2015,14(2): 557-578. [Wang Min,Huang Ying.China's environmental pollution and economic growth. *China Economic Quarterly*, 2015,14(2): 557-578.]

[8] 屈小娥.1990~2009年中国省际环境污染综合评价[J].*中国人口·资源与环境*,2012, 22(5): 158-163. [Qu Xiao'e. China's provincial environment assessment: An empirical analysis based on the years from 1990 to 2009. *China Population, Resources and Environment*, 2012, 22(5): 158-163.]

[9] 李静,吕永龙,贺桂珍,等.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*,2008, 29(9): 2684-2688. [Li Jing, Lv Yonglong, He Guizhen et al. Spatial and temporal changes of emerging environmental pollution accidents and impact factors in China. *Environmental Science*, 2008, 29(9): 2684-2688.]

[10] 周侃,樊杰.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*,2016,71(11):1911-1925. [Zhou Kan, Fan Jie. 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. *Acta Geographica Sinica*, 2016, 71(11):1911-1925.]

[11] Shin I J. Major industrial accidents in Korea: The characteristics and implication of statistics 1996-2011[J]. *Process Safety Progress*, 2013, 32(1): 90-95.

[12] Rimayi C, Odusanya D, Weiss J M et al. Contaminants of emerging concern in the Hartbeespoort Dam catchment and the uMngeni River estuary 2016 pollution incident, South Africa[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 627: 1008-1017.

[13] Smith G E, Bawa Z, Macklin Y et al. Using real-time syndromic surveillance systems to help explore the acute impact of the air pollution incident of March/April 2014 in England[J].*Environmental Research*, 2015, 136: 500-504.

- [14] 杨娅,马俊伟,刘仁志.上海市突发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, 2012, 22(141): 105-109. [Yang Ya, Ma Junwei, Liu Renzhi. Temporal and spatial patterns of abrupt environmental incidents and its causative factors in Shanghai. China Population, Resources and Environment, 2012, 22(141): 105-109.]
- [15] 杨洁,毕军,张海燕,等.中国环境污染事故发生与经济动态关系[J].中国环境科学, 2010,30(4):571-576.[Yang Jie, Bi Jun, Zhang Haiyan et al. Evolution of the relationship between environmental pollution accident and economic growth in China. China Environmental Science, 2010, 30(4): 571-576.]
- [16] 薛鹏丽,曾维华.上海市突发环境污染事故风险区划[J].中国环境科学, 2011, 31(10): 1743-1750.[Xue Pengli, Zeng Weihua. Shanghai environmental accidents risk regionalization. China Environmental Science, 2011,31(10): 1743-1750.]
- [17] 丁镛,黄亚林,刘云浪,等. 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, 2015, 34(6): 749-760.[Ding Lei, Huang Yalin, Liu Yunlang et al. Spatio-temporal variability of sudden environmental pollution incidents and influencing factors in China, 1995-2012. Progress in Geography, 2015, 34(6): 749-760.]
- [18] 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, 2007-2017.[National Bureau of Statistics, Ministry of Environmental Protection of China. China Statistical yearbook on environment. Beijing: China Statistics Press, 2007-2017.]
- [19] 国家统计局.中国统计年鉴[M].北京:中国统计出版社, 2007-2017.[National Bureau of Statistics. China statistical yearbook. Beijing:China Statistics Press, 2007-2017.]
- [20] 中国环境年鉴编辑委员会.中国环境年鉴[M].北京:中国环境科学出版社, 2007-2017.[China Environmental Yearbook Editorial Board. China environment yearbook. Beijing: China Environmental Science Press,2007-2017.]
- [21] 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, 2017.[Department of Urban Social Economic Survey of the National Bureau of Statistics. China city statistical yearbook. Beijing: China Statistics Press, 2017.]
- [22] 赵雪雁,王伟军,万文玉.中国居民健康水平的区域差异: 2003-2013[J].地理学报,2017,72(4): 685-698.[Zhao Xueyan, Wang Weijun, Wan Wenyu. Regional inequalities of residents' health level in China: 2003-2013. Acta Geographica Sinica, 2017, 72(4):685-698.]
- [23] Wang J F, Zhang T L, Fu B J. A measure of spatial stratified heterogeneity [J]. Ecological Indicators, 2017, 67: 250-256.
- [24] 张杰,唐根年.浙江省制造业空间分异格局及其影响因素[J].地理科学, 2018, 38(7): 1107-1117. [Zhang Jie, Tang Gennian. Spatial differentiation pattern of manufacturing industry in Zhejiang and its influencing factors. Scientia Geographica Sinica, 2018, 38(7): 1107-1117.]
- [25] 席强敏.城市效率与城市规模关系的实证分析:基于2001-2009年我国城市面板数据[J].经济问题, 2012(10): 37-41.[Xi Qiangmin. Empirical research on the relationship between city efficiency and city size: Based on city panel data from 2001 to 2009 in China. On Economic Problems, 2012 (10):37-41.]
- [26] 李晶晶,苗长虹.长江经济带人口流动对区域经济差异的影响[J].地理学报, 2017, 72(2): 197-212. [Li Jingjing, Miao Changhong. Impact of population flow on regional economic disparities in the Yangtze River economic belt. Acta Geographica Sinica, 2017, 72(2): 197-212.]
- [27] 李名升,张建辉,张殷俊,等.近10年中国大气PM<sub>10</sub>污染时空格局演变[J].地理学报,2013,68(11):1504-1512.[Li Mingsheng, Zhang Jianhui, Zhang Yinjun et al. Spatio-temporal pattern changes of ambient air PM<sub>10</sub> pollution in China from 2002 to 2012. Acta Geographica Sinica, 2013, 68(11): 1504-1512.]
- [28] 胡志强,苗健铭,苗长虹.中国地市工业集聚与污染排放的空间特征及计量检验[J].地理科学,2018, 38(2): 168-176.[Hu Zhiqiang, Miao Jianming, Miao Changhong. Spatial characteristics and econometric test of industrial agglomeration and pollutant emissions in China. Scientia Geographica Sinica, 2018, 38(2): 168-176.]
- [29] 周侃.中国环境污染的时空差异与集聚特征[J].地理科学, 2016, 36(7): 989-997.[Zhou Kan. Spatial-temporal differences and cluster features of environmental pollution in China. Scientia Geographica Sinica, 2016, 36(7): 989-997.]
- [30] 王增利,刘学军,陆娟.入室盗窃多尺度地理因子分析[J].地理学报,2017,72(2): 329-340.[Wang Zengli, Liu Xuejun, Lu Juan. Multiscale geographic analysis of burglary. Acta Geographica Sinica, 2017, 72(2): 329-340.]

## Spatio-temporal Distribution and Influencing Factors of Environmental Pollution Incidents Based on Multi-scales in China

Zhao Xueyan, Wang Rong, Wang Xiaoqi, Liu Jianghua

*(College of Geography and Environment Science, Northwest Normal University, Lanzhou 730070, Gansu, China)*

**Abstract:** Environmental pollution incidents have become a major challenge for human social development, seriously restrict the sustainable development. Therefore, it is urgently necessary to clarify the temporal and spatial characteristics of pollution incidents and its influencing factors, in order to provide references for the formulation of effective environmental protection policies. In this paper, used the Theil index, coefficient of variation, ESDA and other methods to analyze the spatial distribution characteristics of pollution incidents from 2006 to 2016 in China, and the GeoDetector to identify the influencing factors at different scales. The results showed that: 1) At the provincial scales, the occurrence frequencies of environmental pollution incidents and the occurrence of environmental pollution incidents at different levels both showed fluctuating downward trends, and their frequency and regional differences all showed 'East-Central-West' low-lying land patterns. 2) At the prefecture-level cities scale, the frequency of environmental pollution incidents is reduced as the decreases of city scale, and the U-shaped change occurs with the decrease of economic development level, the frequency of pollution incidents in key environmental protection cities is higher than ordinary cities, difference of environmental pollution incidents is reduced as the decreases of city scale and economic development level, and the environmental protection key cities are higher than ordinary cities. 3) The environmental pollution incidents in east of the 'Hu Line' are frequent and diverse, and the western pollution incidents are rare and single, and the spatial distribution of different levels of environmental pollution incidents were quite different. 4) There existed differences in impacting factors at different scales, and as the scale increased, the correlation between impacting factors and environmental pollution incidents also increased. Among them, the level of economic development and the level of environmental supervision all had vital impacts on environmental pollution incidents. The interaction between environmental supervision and other factors had the significant impacts to the environmental pollution incidents.

**Key words:** environmental pollution incidents; regional differences; GeoDetector; China