

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

高 爽^{1,2}, 魏也华³, 陈 雯¹, 赵海霞¹

(1. 中国科学院南京地理与湖泊研究所, 南京 210008; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100039;
3. 犹他大学地理系及公共与国际事务研究院, 美国 盐湖城 84112-9155)

摘要: 制造业集聚是城市发展的重要动力, 同时也可能对生态环境产生负效应。论文拟以无锡市区为例, 利用核密度函数(Kernel Density Distribution)对污染密集型制造业集聚程度进行评价, 按照河流自然综合特征划分的环境单元进行污染物分布格局评价, 在此基础上构建污染企业分布密度—COD排放量的双变量空间自相关模型, 探讨制造业与河道污染物分布格局的定量关系, 揭示制造业集聚和水污染的空间关联性。模型分析表明: 无锡市区的污染密集型制造业呈现向郊区和环境非敏感区集聚的趋势, 污染强度以主要运河为轴线向两翼地区逐渐衰减, 二者空间格局的关联性存在行业差异性, 污染物分布与纺织、石油化工业以及冶金业集聚和扩散格局的空间关联性较为显著, 而与食品制造业和造纸印刷业的空间关联性则不显著。论文进一步根据产业集聚与污染格局的空间关联模式, 将研究区域划分为高集聚—高污染、低集聚—低污染、低集聚—高污染、高集聚—低污染四种类型区, 并提出相应的产业准入导向。本研究从空间效应角度为产业集聚与生态环境之间关联机理探讨提供新的视角, 也可以作为制造业布局调整的科学依据。

关键词: 产业集聚; 核密度函数; 水污染; 制造业; 空间自相关

文章编号: 1000-0585(2011)05-0902-11

1 引言

制造业集聚, 通过发挥规模效应、集聚效应、关联效应和扩散效应, 促进城市空间扩展和分工协作, 成为推动城市发展的重要动力^[1~4]。然而, 并非产业的集聚程度越高, 产生的经济社会和环境效益越高。一些研究表明当产业高度集中, 超过了该区域的环境承载力时, 对环境的不良影响也会累积, 例如诱发水环境恶化、大气污染、土壤污染、生物多样性减少等一系列生态环境恶化问题, 环境对产业的支撑能力逐渐降低, 集聚所带来的外部不经济性增强^[5~8]。然而, 生态环境的恶化并不是产业集聚本身造成的, 而是粗放型的生产方式及对于生态环境重视程度不够等其他原因造成的, 如果实现产业集聚生态化, 其对于生态环境是有正面效应的^[9], 所以不同的集聚程度可能对应不同的污染效应。当前我国经济发达的城市地区正处于制造业转型时期, 伴随结构变迁和城区功能提升, 大量污染严重的企业实行有计划的外迁等^[10], 企业的空间重组必然对城市生态环境产生新的影响。因此, 本研究从产业集聚与环境之间关系的角度出发, 对产业集聚的环境效应进行论证,

收稿日期: 2010-06-21; **修订日期:** 2010-10-12

基金项目: 国家自然科学基金项目(40771053、70703033); 美国福特基金(1085-1022)

作者简介: 高爽(1984-), 女, 江苏连云港人, 博士生, 主要研究方向为区域发展与规划。

E-mail: gaoshuang06@mails.gucas.ac.cn

着重研究制造业布局的重新集聚和扩散及其对发达地区城市环境质量产生的影响，这是产业集聚与生态环境关联性研究的重要方向，也对城市可持续发展有现实指导意义。

国内外学者对产业空间集聚格局的生态环境响应进行了一定的理论和实证研究。研究内容侧重于产业的动态变化对城市生态环境影响的评价，多将产业集聚作为城市可持续发展的重要因素来评价环境对产业布局的响应。如 Rigina 对不同发育阶段城市群地区采矿业对大气、土壤、河流等生态环境要素的影响进行了动态评价^[11]，Grazi 等将产业集聚作为评价可持续发展的一个因子，结合外部性以及社会福利等指标，构建了较为全面的评价城市可持续发展的模型^[12]。近年来，我国加强了产业调整的力度，并且相关研究中都一定程度的融进了产业经济要素^[13,14]，赵雪艳分析了甘肃省产业转型及其生态环境效应^[13]，彭建等人通过构建不同产业类型的生态环境影响系数与区域产业结构的总体生态环境影响指数，评价了产业结构对环境的影响^[14]。但是，已有的研究重产业集聚的生态环境要素外部响应研究，轻产业集聚要素结构以及空间布局的生态环境影响机理分析，更忽视了产业集聚与生态环境相互作用规律剖析^[15]。在研究方法上，多应用相关分析、回归分析、计量经济模型以及空间经济学模型定量的研究产业集聚的生态响应过程，但是多集中于对宏观面板数据的分析，而较少从企业分布的角度分析其对污染空间分布的影响，从而无法从微观角度深入的分析产业集聚格局与水环境格局两者在空间上的关联性与耦合性，导致了对两者空间相互关系的分析较为薄弱^[16~18]。此外国内对于此类研究多集中于大、中尺度地理范围，而对于市区等小尺度的研究较为少见。为弥补以上研究不足，本文以无锡市区为例，运用空间统计学方法，定量剖析制造业集聚与水环境污染的耦合关系及其相互作用规律。

无锡市区，是长三角的重要中心城市和现代工业城市，经济发达，2008 年人均地区生产总值 73053 元。而支撑经济总量的制造业中，如纺织业、石油化工行业、冶金业等污染密集型制造业约占工业增加值 40% 左右，污染排放量却占到全部行业的 85% 以上^①。同时该区总面积 1621km²，其中水域面积占 40%，是水网密布和水环境功能敏感的地区，并且水污染问题是各类环境问题的重中之重，是企业对生态环境影响的最直接的体现。因此，本文基于制造业污染企业和水污染物排放数据分析，考察制造业集聚的水环境污染效应，依此提出相应的产业准入和布局调整导向，以期为制造业的合理集聚与水环境保护的协调发展提供依据。

2 数据来源和研究方法

2.1 数据来源和行业分类

根据相关文献^[19]分析以及无锡市区的制造业发展状况，主要选择纺织业、食品制造业、造纸业、石油化工业、冶金业等企业作为污染密集型的产业研究对象（表 1）。其中企业数据^②以 2008 年规模以上工业企业为主（共计 1930 个企业），以污染企业点位分布与属性信息以及研究区域大比例地形图为基础，利用地址信息对每一个企业进行空间化处理，将企业地址与 2008 年无锡市电子地图的空间信息进行人工匹配，建立污染企业空间数

^①引自《无锡市统计年鉴 2009》。

^②研究数据主要来自于当地经济与环境部门提供的数据，相关的矢量图件来源于无锡市水利和交通部门提供的水系和交通现状图。

据库。COD是国家在“十一五”期间明确的实施排放总量控制的最主要的水体污染物，是人类活动对水质环境影响的最直接表征，COD排放量越大，给水体环境造成的压力也就越大，故选取工业化学需氧量（COD）为表征指标来评价水污染分布情况。

表 1 污染密集型行业分类

Tab. 1 Classification of pollution-intensive manufacturing industries

研究对象	行业类别	产品类别
污染密集型 制造业	纺织业	纺织印染业、制革与毛皮鞣制业
	食品制造业	发酵制品业、罐头食品翻造业、调味品制造业，饮料制造业中的酒精及酒制造业、农副食品加工业中的植物油加工业、制糖业
	造纸业	纸浆及纸制品业
	石油化工业	石油加工、化学原料及化学制品制造业，医药制造业，化学纤维制造业
	冶金业	炼焦业，黑色金属冶炼，有色金属冶炼

2.2 研究方法

首先，基于以上数据库分别对污染密集型制造业集聚程度和污染物分布格局进行评价；其次，运用GIS的空间叠加分析以及地统计分析，通过构建污染企业分布密度—COD排放量的双变量空间自相关模型，定量研究区域制造业集聚的水污染效应。

2.2.1 产业集聚度评价 产业集聚是生产力实现空间布局上的优化，是各种生产要素在一定地域范围的大量集聚和有效集中。产业集聚度即表征各类行业的点在空间的集中程度。由于数据库中的企业以空间点位数据为主，基于点数据的模式计算整个区域的产业集聚情况，具体采用估计序列密度函数的非参数估计方法—核密度分布（Kernel Density Distribution）。即以每个待计算网格点为中心，进行圆形区域的搜索，进而计算每个网格点的密度值。设 x 处的核密度分布函数为 $f(x)$ ^[20]：

$$f(x) = \frac{1}{nh} \sum_{i=1}^n k\left(\frac{x - X_i}{h}\right) \quad (1)$$

式中， x 为待估计的企业点位置， X_i 为落在以 x 为圆心， h 为半径的圆形范围内的第 i 个企业的位置， h 为带宽，在具体应用中，应根据研究范围的大小进行反复试验，随着 h 的增大，计算结果分布会较为平滑，但是误差也随之增大。 n 是圆形范围内的企业点的数量， k 是表示空间权重的核函数，落入搜索区内的点具有不同的权重，靠近网格搜寻区域中心的点会被赋以较大的权重，随着其与网格距离的加大，权重降低。借助于GIS软件中空间分析模块的密度分析命令计算每个网格的企业分布密度值，并将网格单元的核密度值进行聚类分析。同时，采用全局自相关系数 Moran's I 从整体上表征各行业在空间上的集聚度。

2.2.2 基于环境单元的水污染评价 基于环境单元的水污染评价法是按照流域内所含河流的主导流向、分水区位置、干支流交汇特点、上中下游不同河段及两侧陆域汇水排水状况等流域的自然综合特征，将区域划分为若干个环境单元，以此作为评价单位来分析污染物分布^[21]。此方法不仅可以从空间角度直观的研究企业集聚对水环境所造成的压力，而且可以从流域环境容量和承载力的角度研究各个流域单元可供开发的潜力，进而为制造业布局的调整提供依据。

根据无锡市的水系格局以及总面积，将其划分为望虞河流域、锡北运河—九里河流域、锡澄运河流域、江南运河—伯渎港流域、直湖港流域、太湖（含蠡河）流域等6个流

域单元。在此基础上,以 8 条骨干河道为经络,进一步划分为 47 个二级环境评价单元(图 1)。由于本文主要研究产业集聚与水污染格局的空间耦合性,所以对于污染格局的评价主要以流域单元内企业的污染排放数据为基础进行分析。每个评价单元的污染物排放强度由如下公式得出:

$$COD_{srenth} = \sum_{j=1}^n COD_j / A_i \quad (2)$$

式中, COD_{srenth} 为环境单元 i 的污染物排放强度, COD_j 为环境单元 i 内的所有企业的污染物排放总量, A_i 为环境单元 i 的面积。根据各单元的污染排放强度,采用聚

类分析方法将 47 个环境单元的污染水平划分为高、较高、较低和低 4 个等级。

2.2.3 产业集聚和特征污染物指标的空间自相关模型构建 传统数量统计分析只注重数值之间的关系,而忽略了其空间关系,为了在空间分析的基础上对数值进行相关分析,采用 ArcGIS 中的空间自相关模型研究产业集聚和水环境质量的空间格局相关性^[10,23,24]。首先,根据地区的具体面积、企业点的数量,将企业点位切分到 $1500\text{m} \times 1500\text{m}$ ^① 的网格中,计算各网格的企业点的密度,运用叠加分析将带有企业点位信息的面图层与以环境单元为单位的面图层进行叠加,形成同时具有各叠加要素层的多重空间属性和统计特征的数据层。在此基础上,采用全局和局部的双变量空间自相关模型。运用全局自相关系数 Moran's I 来比较产业集聚程度和水环境质量的相关性以及其在空间位置的异质性;具体操作为:首先,建立包含不同空间单元之间邻居关系的空间权重矩阵,然后以网格为评价单元,运用表征全局空间自相关的统计量全局 Moran's I 来研究其空间分布格局。其具体表达形式如下:

$$I_{ap} = \frac{n \sum_i \sum_{j \neq i} \tau_{ij} z_i^a z_j^p}{(n-1) \sum_i \sum_{j \neq i} \tau_{ij}} \quad (3)$$

$$s^2 = \frac{1}{n} \sum_i (x_i - \bar{x})^2 \quad (4)$$

式中, I_{ap} 为产业集聚 a 和污染物 p 的双变量自相关系数,该值越大,表示此类制造业的空间集聚与污染物空间分布的相关性越大; n 为研究区域内不规则空间单元的个数,文中表

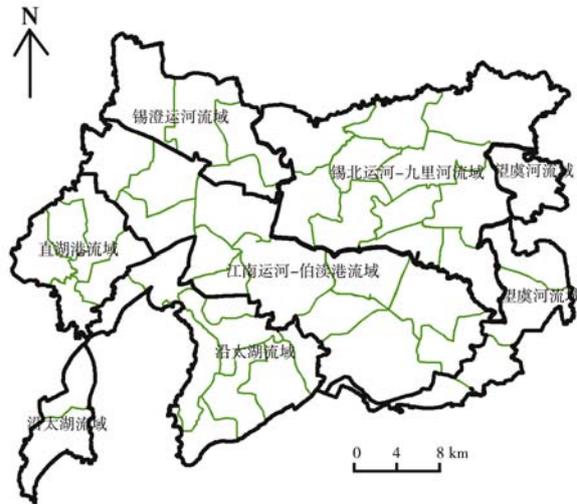


图 1 环境评价单元划分

Fig. 1 Division of environmental evaluation units

^① 本文的网格大小根据文献^[22]提供的经验公式来选择,最优样方尺寸可以根据区域的面积和分布于其中的点的数量确定,计算公式为 $Q = 2A/n$, 其中, Q 是样方的尺寸, A 为研究区域的面积, n 是研究区域中企业点的数量。从而最优样方的边长取 $\sqrt{2A/n}$, 格网的数量大约为 $n/2$ 个。为此,本文利用 591 个格网覆盖整个区域,每个格网大约为 1500×1500 米。

示网格数； z_i^a 为在空间地域单元*i*上企业个数的均值标准化数据， z_j^p 分别为与*i*临近网格中污染排放量的标准化值；式（4）中空间权重矩阵元素 w_{ij} 采用行标准化形式，即

$$\sum_i^n \sum_{j \neq i}^n w_{ij} = n \quad (5)$$

然而，由于全局自相关模型的计算结果是一个单一数值，不能很好的反应不同位置上的空间变异程度，而局部空间关联指标（local indicators of spatial association, LISA）可以用来识别不同空间位置上可能存在的空间关联模式，从而可以观察空间局部不平稳性，发现数据之间的空间异质性，为分析提供依据。计算公式如下：

$$I_i^{ap} = z_i^a \sum_j^n w_{ij} z_j^p \quad (6)$$

式中， z_i^a 和 z_j^p 是观测值的均值标准化，式中空间权重矩阵元素 w_{ij} 采用行标准化形式。 I_i^{ap} 表示位置*i*上的企业个数与周围污染排放的加权平均的乘积。若 I_i^{ap} 显著为正，则表明位置*i*的企业分布与污染排放量具有正相关性；若 I_i^{ap} 显著为负，则表明位置*i*的企业分布与污染排放量具有负相关性；如结果不显著，则表明位置*i*的企业分布与污染排放量无明显的关联性。

3 结果分析

3.1 无锡市污染型制造业布局分析

采用以上的核密度分布函数考察2008年无锡市制造业的空间布局和集聚程度。考虑到模型计算与简化的需要，同样选取1500×1500m的网格作为输出单元；带宽*h*根据多次调试选择5km，分析结果如图2所示。整体上，污染密集型企业主要集中在惠山区、新区及锡山区的南部地区，北塘区、南长区及崇安区等中心城区分布较少，说明污染企业呈现一定的郊区化趋势：其中食品制造业主要分布在北塘区，其他各区都有零星分布；纺织业主要分布在惠山区的中部和北部；造纸业主要分布于锡山区的南部和东南部以及新山区的东南部；石化工业主要分布于惠山区、新区东南部；冶金业主要分布于惠山区的南部，距离市中心的距离较近。通过对以上网格内的污染企业分布密度进行空间自相关分析得出，污染企业的空间分布存在着不均衡性和行业差异性，食品制造业、纺织业、造纸印刷业、石化工业以及冶金业的全局自相关系数（Moran's I）分别为0.2025、0.4064、0.2822、0.2317、0.1743，说明纺织业的集聚度最高，其次为造纸印刷业、食品制造业、石化工业，冶金业则最低。

无锡市上述制造业集聚格局是受产业发展基础、区域资源环境承载力和污染管制政策等因素的综合效应而形成的。中心城区主要以重点发展生产性服务业和都市型工业为主，除了食品制造业，其他类型的企业布局相对比较分散。惠山区是乡镇企业的发源地，惠山经济开发区和钱桥、洛社、前洲、玉祁等工业集中区都是重要的制造业集聚地，此外，该地区的资源环境承载力较大，生态敏感性较环太湖地区的滨湖区低，属于优化开发和重点开发的区域，承接市区工业企业的北移，因此这部分地区多属于污染企业高集聚区。锡山区的自然地理条件与惠山区相似，锡山经济开发区和新世纪工业园等工业集中区主要布局在东亭、安镇等地，因此该地区也形成了污染密集型行业的高集聚区，其中，东港红豆工业园主要是以高特纺织与服装为主，纺织企业较为密集。滨湖区特殊的环太湖地理位置，使得其生态环境的敏感性较强，属于无锡市环境保护重点管制区，2007年全区化

工业企业 93 家，其中关闭 32 家，截止 2008 年底，近 50 家化工企业被关闭，故污染密集型企业分布相对较少。新区主要凭借外向型经济发展的基础，以国家高新技术开发区和新加坡工业园为主要集聚地，建设国际制造业高地，所以制造业也相对较为密集。

总体来说，由于受退城进园，制造业北移，逐渐关闭高污染高能耗企业等政策的影响，无锡市区的污染密集型企业由原先的主要以靠近中心城区和主要的交通干道为主的集聚格局逐渐向郊区和环境非敏感地区扩散的集聚格局转变。此外，由于造纸、饮料、纺织等一些高污染低附加值的企业逐渐被“关、停、并、转”，无锡市区的污染密集型企业制造业的结构日趋调整，各类产业在空间上表现为不同程度的集聚态势，而这种污染企业的转移和布局模式的转变势必会对污染的布局产生一定的影响。在以下的研究中将进一步分析产业结构和布局模式对污染布局的影响。

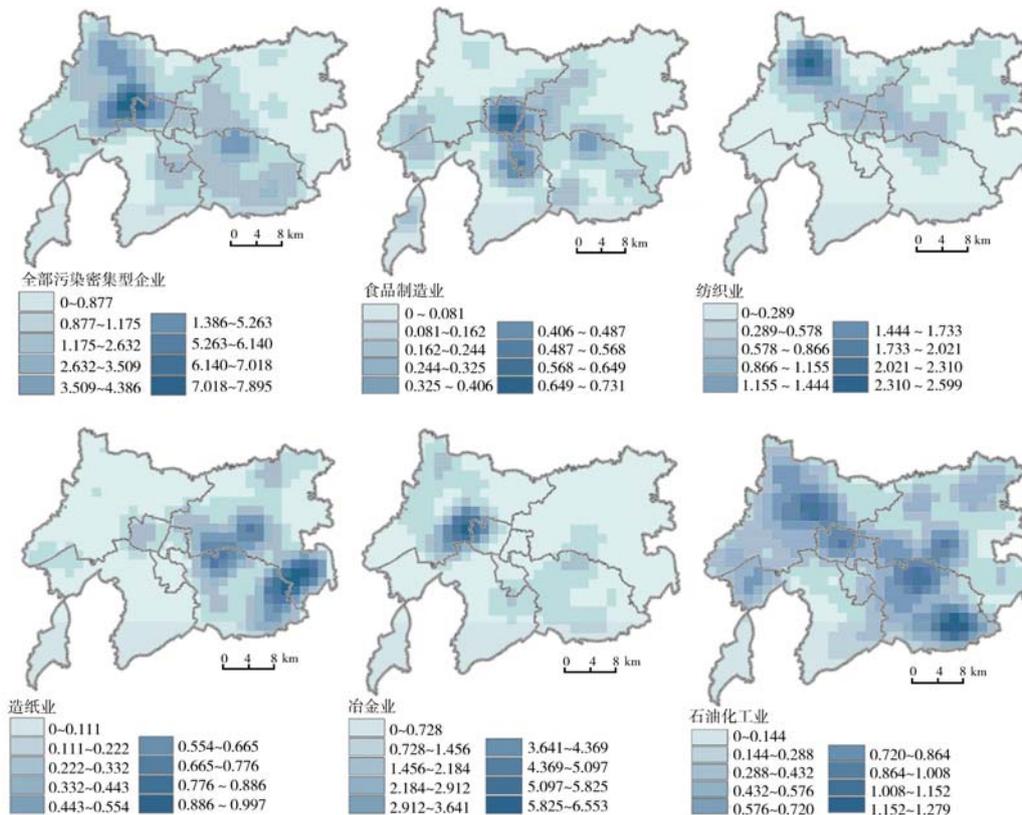


图 2 污染密集型企业核密度估计

Fig. 2 Kernel estimation for pollution-intensive manufacturing industry

3.2 无锡市区水污染空间格局

图 3 为无锡市区化学需氧量 (COD) 排放强度分布图。由评价结果知，最大排放强度为 $272.90\text{t}/\text{km}^2$ ，最小为 $0.6\text{t}/\text{km}^2$ ，其变异系数为 0.48。说明无锡市区的污染分布也呈空间分布不均衡的格局，污染排放量较高的区域主要分布于江南运河—伯渎港流域、锡澄河流域、锡北河流域的南部等地，该地区是重要的排水通道，水体通达性较好，虽然污染严重，但是水环境容量较大，因此具有较高的开发潜力；直湖港和望虞河流域属于污染

水平较低的区域,但由于所处流域性的清水通道维护区,其水质要求较高,区域可开发强度相应较低;太湖流域以及锡北运河的北部地区属于污染最低的区域,由于沿太湖地区是重要生态功能保护区分布的区域,其水质要求很高,虽然污染排放很少,但是由于水环境容量小,开发潜力也很低,而锡北运河流域的水环境容量相对较高,工业开发潜力较大。总体上,无锡市区的污染强度以主要运河为轴线向周围地区逐渐衰减的趋势。

3.3 污染型企业与水环境质量空间耦合

不同制造业门类的集聚会产生不同的水污染效应,选择对水污染较重的五类行业分别进行研究,运用双变量的空间自相关模型考察不同污染密集型行业与水环境污染物空间分布格局之间的关联性。结果表明,食品制造业—COD、纺织业—COD、造纸印刷业—COD、石油化工业—COD 以及冶金业—COD 的双变量全局自相关系数 (Moran's I) 分别为 0.0006、0.1931、-0.0623、0.1241、0.1428,说明污染密集型行业与污染物排放强度之间存在着不同的空间关联程度,其中,纺织业与 COD 排放强度之间的空间相关性最强,冶金业和石油化工业次之,造纸印刷业、食品制造业与 COD 排放强度未呈现明显的空间相关性。

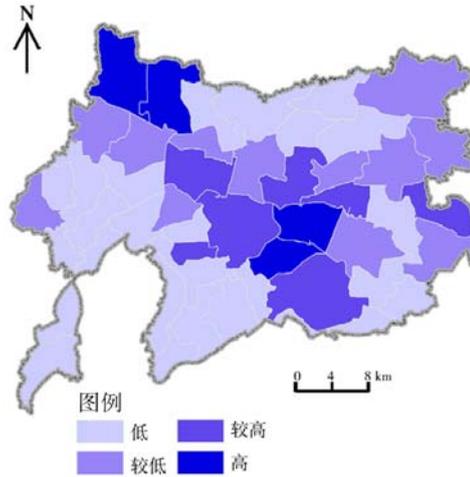


图 3 污染物排放强度分布格局

Fig. 3 Spatial distribution of pollution emission density

为了进一步考察以上格局形成的原因,选取纺织业、冶金业以及石油化工业作为研究对象,分析污染行业与污染物排放强度之间的局部空间自相关分布格局(图4)。用表格表示各区域具体类型的空间关联模式的网格占该类型所有网格的数量(表2)。

表 2 分行业的企业—污染格局空间关联模式

Tab. 2 Spatial autocorrelation modes of different manufacturing industries

关联模式	High—High			Low—Low			Low—High			High—Low		
	纺织	石油 化工	冶金	纺织	石油 化工	冶金	纺织	石油 化工	冶金	纺织	石油 化工	冶金
江南运河-伯渎港	41.77	46.47	46.48	16.41	13.41	13.22	41.55	37.63	38.01	16.36	22.70	29.99
锡澄运河	22.78	20.59	16.90	1.26	2.62	2.49	19.32	21.13	23.53	6.36	1.84	1.87
锡北运河-九里河	25.32	20.59	21.13	20.96	24.49	27.68	19.81	23.71	23.08	38.19	25.15	13.08
望虞河	5.06	5.88	4.93	17.17	16.91	16.96	11.11	10.31	10.86	15.45	16.56	15.89
直湖港	0	0.59	0	13.89	11.66	10.72	0.97	5.16	0.91	10.91	16.56	22.43
沿太湖	5.06	5.88	10.56	30.30	30.90	28.93	7.24	6.70	3.62	12.73	17.18	16.83

从整体来看,三类行业与污染布局的空间耦合存在着一定的空间相似性,即沿主要河流域基本上属于高集聚—高污染 (High—High) 或者低集聚—高污染 (Low—High)

地区；而沿重要的生态功能区基本上属于低集聚—低污染区（Low—Low）或者高集聚—低污染区（High—Low）。所不同的是，在沿太湖和沿直湖港流域，由于石油化工业和冶金业仍有一定比例的分布，导致了此二类行业所拥有的高集聚—低污染区明显较纺织业要多。在此基础上，将全部污染密集型产业作为整体（图5），对污染与集聚的空间耦合关系分别进行分析。与此同时，根据当前不同环境单元的环境容量及目前污染程度，对产业集聚的水污染的效应进行具体分析，并对不同类型区进行制造业集聚程度的引导，以便能够更好地达到产业与环境协调发展的目标。

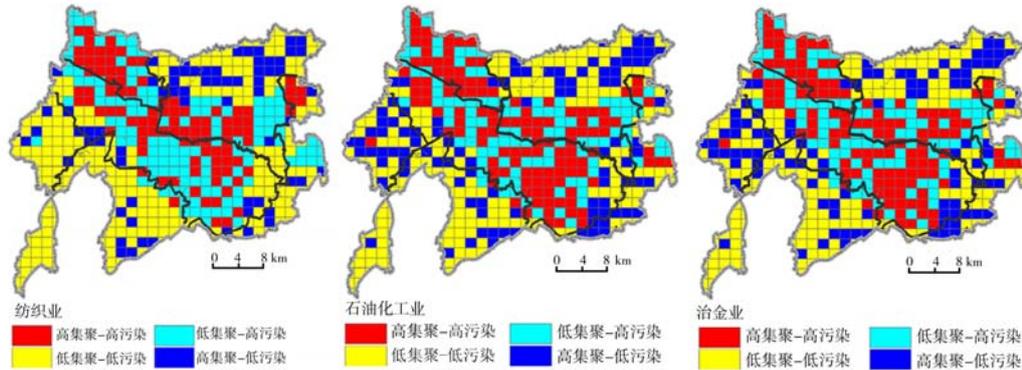


图4 分行业的企业格局与污染物排放相关性示意

Fig. 4 Spatial autocorrelation analysis of industry location and pollution distribution

高集聚—高污染区：是指污染密集型企业集聚、污染严重的区域。该区域的污染企业集聚程度与COD的排放强度之间有着强烈的空间正相关性，主要集中于江南运河的上游（下游）、锡澄运河、锡北运河的南部等流域，总面积约375.9km²，占研究区域的23.2%。此类地区多属于平原地区，空间开敞性大，且有江南运河、锡北运河、锡澄运河、北兴塘、走马塘等排水通道穿过，水体排污能力较好，因此水环境承载能力高，该区域的纺织、化工以及冶金等污染密集型企业都分布较多，并成为造成污染较为严重的主要影响因素。此类地区虽然承载力和环境容量较高，但是污染企业所带来的环境压力也较大，除了锡澄运河外，水质目标都未达标。未来的管制方向是提高产业发展技术水平，适度提高环境准入标准，污染治理设施达到国际先进水平、实施清洁生产，发展循环经济，执行三同时制度；对于新建项目，要提高其环境准入门槛，严格实施环境影响评价制度，强化总量控制和环保执法力度，尽量降低污染物的排放总量。

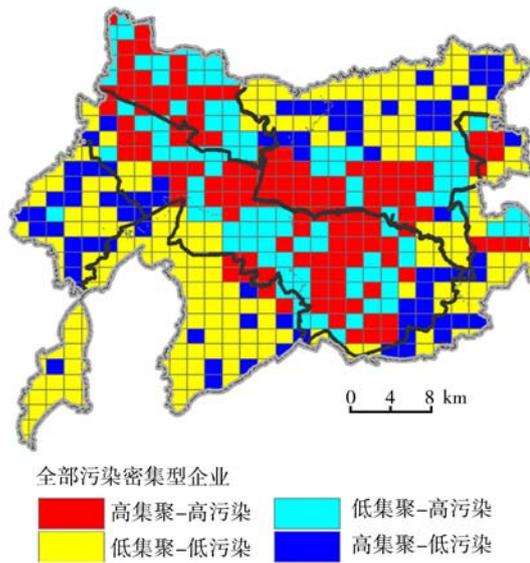


图5 产业集聚和污染物分布的相关性示意图
 Fig. 5 Spatial correlation sketch of industrial agglomeration and pollution distribution

适度提高环境准入标准，污染治理设施达到国际先进水平、实施清洁生产，发展循环经济，执行三同时制度；对于新建项目，要提高其环境准入门槛，严格实施环境影响评价制度，强化总量控制和环保执法力度，尽量降低污染物的排放总量。

低集聚—低污染区：是指污染密集型企业较为分散，污染较轻的区域。该类区域主要集中于沿太湖、望虞河南部、锡北运河北部等地区，总面积约 690.5km²，占所研究区域的 42.6%。太湖沿岸地区基本为山地丘陵区，生态环境较为敏感，水环境承载能力低，属于禁止开发或者限制开发的区域；惠山区西部、滨湖区东南部以及锡山区东南部有直湖港、望虞河等清水通道过境区域，水环境承载能力也较低，随着对污染产业的空间管制，该类型地区的污染企业逐渐被关闭或者搬迁，污染也较轻。此类地区虽然污染企业较少，对环境造成的压力也相应较小，但是该区域的环境承载力也相对较低，特别是受到太湖地区环境保护的严格约束。对该类地区，要加大污染企业管制力度，提高污染密集型产业的准入门槛，严禁发展污染排放的制造业，防止形成新的污染源，有序转移传统的高能耗、高污染、低附加值的制造业。此外，锡北运河的北部地区生态环境承载力较高，且目前的污染企业与污染分布相对稀疏，区域环境容量和潜力较大，可承接污染型产业的转移和准入。

低集聚—高污染区：是指污染密集型企业较为分散，污染较重的区域，表明该地区的纺织、石油化工以及冶金业比较分散，这种低集聚的产业模式也造成了环境污染。该类区域主要分布于沿江南运河—伯渎港流域、九里河流域、锡澄运河的部分地区，总面积约 303.4km²，占所研究区域的 18.7%。该区域虽然环境容量和纳污能力较强，但是目前的环境污染较为严重，因此未来管制的方向是限制水污染项目的发展和布局，设置较高的环境准入门槛，同时促进相关产业的集聚发展和污染物的集中治理，提高污染处理的水平和排放标准。

高集聚—低污染区：是指污染密集型企业集聚、污染较轻的区域，说明企业的污染治理水平相对较高，企业的集聚有利于污染的集中处理。该类区域分布较为分散，总面积约 251.2km²，占所研究区域的 15.5%。沿湖和沿清水通道，特别是沿直湖港流域的石油化工和冶金业分布较为密集，对环境有潜在的危害，所以应加强对已有污染企业的管治，制定高水平的环境准入门槛；而沿河流域则可以在总量控制达标的前提下，接受一定的排污，适合污水排放量相对较大的企业和项目布点。

4 结论与讨论

本文以无锡市污染密集型制造业的空间集聚格局和水污染分布格局为研究对象，通过空间自相关模型研究了典型污染密集型行业的水污染效应，并对相应的形成机制进行了初步的分析。研究表明，污染密集型产业呈现了向郊区和环境容量大的地区集聚的格局，而污染排放强度呈现了以京杭运河、锡澄运河、锡北运河等排水通道为轴心向外围地区逐渐衰减的趋势，污染企业集聚和污染物分布格局的空间关联性存在着地域和行业的差异，且该格局的形成与不同地区的产业集聚程度、行业结构、流域的环境承载力以及污染治理水平有着密切的联系。这就要求当地政府根据不同地区面临的环境压力和当地的生态环境承载力进行分区管制，加强集聚地区污染密集型制造业生态产业链的建设和循环经济的实施，实现产业空间布局的最优化配置。

本研究不仅从企业空间分布的角度为产业集聚与生态环境之间关联机理探讨提供新的视角，也为转型时期发达地区的制造业布局调整提供了一定的理论依据。但是，本文在以下方面还有待进一步研究：首先，本文只考察了集聚的水污染分布类型，对机理的研究不够深入，应结合时间序列数据和相关的分析模型，对其产生机制进行系统分析；其次由于企业数据的可得性，本文在考察产业集聚度时，只将企业作为点进行研究，而企业具体规

模对其影响尚不清楚;最后,由于污染排放数据的局限性,只研究了产业集聚对水环境质量的影响,并没有从生态系统的角度考察产业集聚的生态环境效应及其机制,在以后的研究中,应建立更为系统的评价体系,研究产业集聚和生态环境的相互耦合机制。

参考文献:

- [1] Chertow M R, Ashton W S, Espinosa J C. Industrial symbiosis in Puerto Rico: Environmentally related agglomeration economies. *Regional Studies*, 2008, 42(10): 1299~1312.
- [2] Duranton G, Puga D. Micro-foundations of urban agglomeration economies. *Handbook of Regional and Urban Economics*, 2004, 4: 2063~2117.
- [3] Fujita M, Thisse J. Economies of agglomeration. *Journal of the Japanese and International Economies*, 1996, 10: 339~378.
- [4] Krugman P. Increasing returns and economic geography. *Journal of Political Economy*, 1991, 99: 483~499.
- [5] Shao M, Tang X Y, Zhang Y H, *et al.* City clusters in China: Air and surface water pollution. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2006, 4(7): 353~361.
- [6] 周静, 杨桂山. 江苏省工业废水排放与经济增长的动态关系. *地理研究*, 2007, 26(5): 931~939.
- [7] Wang M, Webber M, Finlayson B, *et al.* Rural industries and water pollution in China. *Journal of Environmental Management*, 2008, 86: 648~659.
- [8] Duc T A, Vachaud G, Bonnet M P, *et al.* Experimental investigation and modeling approach of the impact of urban wastewater on a tropical river: A case study of the Nhue River, Hanoi, Vietnam. *Journal of Hydrology*, 2007, 334: 47~358.
- [9] 王崇锋. 生态城市产业集聚问题研究. 北京: 人民出版社, 2009. 250~253.
- [10] 吕卫国, 陈雯. 制造业企业区位选择与南京城市空间重构. *地理学报*, 2009, 64(2): 142~152.
- [11] Rigina O. Environmental impact assessment of the mining and concentration activities in the Kola Peninsula, Russia by multi-date remote sensing. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2002, 75: 11~31.
- [12] Grazi F, Jeroen C J M, Bergh V D. Spatial welfare economics versus ecological footprint: Modeling agglomeration, externalities and trade. *Environmental and Resource Economics*, 2007, 38: 135~153.
- [13] 赵雪雁. 甘肃省产业空间结构及其生态效应分析. *干旱区资源与环境*, 2007, 21(6): 17~21.
- [14] 彭建, 王仰麟, 常青. 区域产业结构变化及生态环境效应. *地理学报*, 2005, 60(5): 798~806.
- [15] 蔺雪芹, 方创琳. 城市群地区产业集聚的生态环境效应研究进展. *地理科学进展*, 2008, 27(3): 110~118.
- [16] 王宜虎, 陈雯, 陈江龙, 等. 江苏省沿江地区工业企业环境压力的 LISREL 模型分析. *地理研究*, 2007, 26(4): 706~711.
- [17] 李鹤, 张平宇, 刘文新. 1990 年以来辽宁省环境与经济协调度评价. *地理科学*, 2007, 27(4): 486~492.
- [18] 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: 157~179.
- [19] 夏友富. 外商投资中国污染密集产业现状、后果及其对策研究. *管理世界*, 1999, 3(14): 109~123.
- [20] Turkey J W. *Exploratory Data Analysis*. US: Addison-Wesley Publishing Company, 1977.
- [21] 陈雯, 嵇振坤, 赵海霞, 等. 水环境约束分区与空间开发引导研究——以无锡市为例. *湖泊科学*, 2008, 20(1): 129~134.
- [22] 袁丰, 魏也华, 陈雯, 等. 苏州市区信息通讯企业空间集聚与新企业选址. *地理学报*, 2010, 65(2): 1~11.
- [23] Luo J, Wei Y H D. Population distribution and spatial structure in transitional Chinese cities: A study of Nanjing. *Eurasian Geography and Economics*, 2006, 47(5): 585~603.
- [24] 范俊涛, 李俊生, 罗建武, 等. 我国环境污染与经济发展空间格局分析. *环境科学研究*, 2009, 22(6): 742~746.

Study on spacial-correlation between water pollution and industrial agglomeration in the developed region of China: A case study of Wuxi City

GAO Shuang^{1,2}, WEI Ye-hua³, CHEN Wen¹, ZHAO Hai-xia¹

(1. Nanjing Institute of Geography and Limnology, CAS, Nanjing 210008, China;

2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China;

3. Development of Geography and IPIA, University of Utah, Salt Lake City, Utah 84112—9155, USA)

Abstract: Agglomeration of the manufacturing industries is not only a fundamental driving force for urban development, but also may bring negative effects on regional environment. This study first estimates the degree of clustering of pollution-intensive manufacturing industries in Wuxi City by introducing the Kernel density distribution function, and then evaluates the pollution distribution pattern by dividing the study area into several environmental units according to the naturally integrated characteristics of the primary streams. We also quantitatively analyze the mechanism of the response of water environment quality to industrial distribution by utilizing the bi-variate spatial autocorrelation model. Results show that pollution-intensive manufacturing industries form clusters in suburban and non-sensitive areas. Besides, the density of pollution sources gradually decreases from the chief canals to the peripheral areas. Spatial autocorrelation analysis shows that spatial-relationship show differences according to industry categories; the agglomeration of textile, petrochemical and metallurgical industries prominently affects the spatial heterogeneity of water pollution distribution. However, the effects of food manufacturing and paper-making industry locations are not significant. Based on the spatial autocorrelation between industrial agglomeration and pollution distribution, we divide the study area into four types: high-agglomeration and high-pollution area, low-agglomeration and low-pollution area, low-agglomeration and high-pollution area, high-agglomeration and low-pollution area. Furthermore, we analyze the formation scheme and provide policy suggestions regarding industrial development. This paper provides a new perspective for the study of the interaction between industrial agglomeration and environment effects, which plays an important role in industrial allocation and sustainable urban development.

Key words: industrial agglomeration; Kernel Density Distribution function; water pollution; manufacturing industry; spatial autocorrelation