

张家口市排污工业点源空间分布格局

仲佳^{1,2}, 于慧¹, 刘邵权¹

(1. 中国科学院、水利部成都山地灾害与环境研究所, 成都 610041; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 基于工业污染源普查数据, 采用缓冲区分析和热点分析法, 分析冀西北张家口市工业点源空间分布格局, 结果表明: (1) 工业点源集中分布在以主城区为中心的东南—西北轴上的邻近区县。张北县和宣化区工业点源污染负荷最重。(2) 工业点源在永定河水系分布最多, 并在洋河流域形成带状分布, 高负荷工业点源分布具有临河性、临城性, 污染物排放高密度区在张北县、宣化区和万全区。(3) 大型、中型、小型和微型企业都主要集中在坝下永定河水系, 其次是内陆河水系。重度污染行业集中排放源分布在张北、沽源和康保县, 轻度污染行业集中排放源分布在坝下永定河水系中洋河与清水河交汇处。通过分析工业点源空间分布格局, 以期政府部门调整规划工业和重点治理水污染区提供依据。

关键词: 张家口市; 工业点源; 空间分布; 缓冲区分析; 热点分析

目前我国环境污染总量尚处于EKC曲线拐点左侧^[1], 环境污染问题尤其是水环境问题仍需特别重视, 而工业发展造成的水环境压力不容忽视。国内外学者多用EKC模型识别环境污染与经济增长之间的关系, 其研究尺度逐渐缩小, 从最初的国家到省级、河流流域, 再到地级市^[2-9], 近年来Tapio脱钩模型开始得到应用, 该模型现多用于长江经济带尺度^[10,11]。随着对二者关系识别的研究不断深化, 周孝德等^[12]、李啸虎等^[13]通过预测估算研究区工业行业(部门)耗水程度对该地区工业结构进行调整优化。国外学者Hosseini等^[14]和Frank等^[15], 国内学者赵小凤等^[16]、张静等^[17]均对环境污染排放的空间格局进行研究。徐林清等^[18]、周侃等^[19]在分析污染物排放空间特征的基础上, 进一步分析其影响因素。国外学者Chapman^[20]早在20世纪80年代初提出空气和水污染影响着德克萨斯州和路易斯安那州石化工厂的集聚效应。但近年来国外对产业布局与水污染的关系关注较少。目前国内学者对二者关系的研究体现在: 王兵等^[21]和苏乔等^[22]对产业集聚是否成为环境治理的“阻力”进行了探讨。高爽等^[23]、蒋海兵等^[24]、徐清华^[25]和周侃等^[26]分别对无锡市、江苏淮河流域、长三角以及全国的产业(经济)集聚和水环境污染在空间上的关系进行研究。

纵观已有成果, 众多学者对水污染与经济的关系识别研究已经成熟且全面, 后又拓展至对水污染物排放空间格局及其影响因素的研究, 并开始探讨产业布局与水环境之间的空间变化, 以上研究对缓和经济水环境矛盾有着重要意义。但目前国内外关于产业布

收稿日期: 2019-07-12; 修订日期: 2020-01-07

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2017ZX07101001); 国家自然科学基金项目(41671529); 四川省科技计划重点研发项目(2019YFS0467); 四川省资源环境承载力监测预警报告(ZXGH201709)

作者简介: 仲佳(1994-), 女, 四川彭州人, 博士研究生, 主要从事资源环境承载力与山区发展规划研究。

E-mail: zhongjia@imde.ac.cn

通讯作者: 刘邵权(1968-), 男, 重庆梁平人, 博士, 研究员, 主要从事山区聚落可持续发展研究。

E-mail: liushq@imde.ac.cn

局与水污染空间关联性的研究相对较少且国内主要以大区域制造业为研究对象，缺乏对市域级别工业点源与水环境空间关系的实证研究。

张家口市工业快速发展的同时伴随着巨大的水环境压力，该市作为2022年冬奥会举办地之一和生态涵养功能区，亟需保障水环境质量。目前，张家口市尚未开展各区县工业点源空间分布格局研究。本文以张家口市为研究区，利用ArcGIS 10.0软件将2017年工业污染源普查数据空间可视化，分析张家口市工业点源分布特征，并深入研究不同污染程度行业工业点源和不同规模工业点源与水环境之间的空间关系，该研究结果可作为张家口市工业调整布局指导依据，以期缓解该地区水环境污染问题，促进地区工业经济与水环境协调发展。

1 研究方法 with 数据来源

1.1 数据来源

该研究工业污染点源数据通过整理张家口市2017年环统数据中各区县排污工业企业名册所得，数据主要包括工业点位（行政区、单位名称、经纬度）、行业类型、企业规模、COD与NH₃-N等主要水体污染物排放量。为保证已有数据的可靠性，最终选择253个排污工业企业作为工业点，以这253个工业点废水污染源作为工业点源，并以工业点源的COD、NH₃-N排放量作为评价研究区水污染的污染负荷指标。

1.2 研究方法

1.2.1 缓冲区分析

缓冲区分析，是在点/线/面的周围按给定的缓冲半径所建立而成的缓冲区（圆形、平行条带多边形或新的面状多边形）。作为ArcGIS中常用的空间分析工具之一，该方法可解决空间实体的邻近度问题，分析该空间实体在周围的影响区域^[27]。

1.2.2 热点分析

热点分析算法叫做Getis-Ord G_i^* 统计，该方法可识别冷、热点区的空间分布，公式为^[28]：

$$G_i^* = \frac{\sum_j^n r_{ij} a_j}{\sum_j^n a_j} \quad (1)$$

$$Z = \frac{G_i^* - E(G_i^*)}{\sqrt{\text{Var}(G_i^*)}} \quad (2)$$

式中： G_i^* 为单元空间*i*的集聚指数； Z 为该集聚指数的显著程度； r_{ij} 为空间权重； a_j 为空间单元*j*的属性值； $E(G_i^*)$ 和 $\text{Var}(G_i^*)$ 分别是 G_i^* 的数学期望和方差。 Z 得分为正，且该值越高意味着*i*地区高值与高值分布越集中（热点区）；反之则意味着*i*地区低值与低值分布越集中（冷点区）。

2 结果分析

2.1 工业点源及其污染负荷分布特征

2.1.1 工业点源空间分布特征

(1) 工业点源各区县分布特征

借助ArcGIS 10.0软件，根据经纬度值将张家口市253个工业点空间可视化，并以工

业COD和NH₃-N排放量作为自然断裂法的分割指标,将工业点源污染负荷进行等级划分,得到图1。

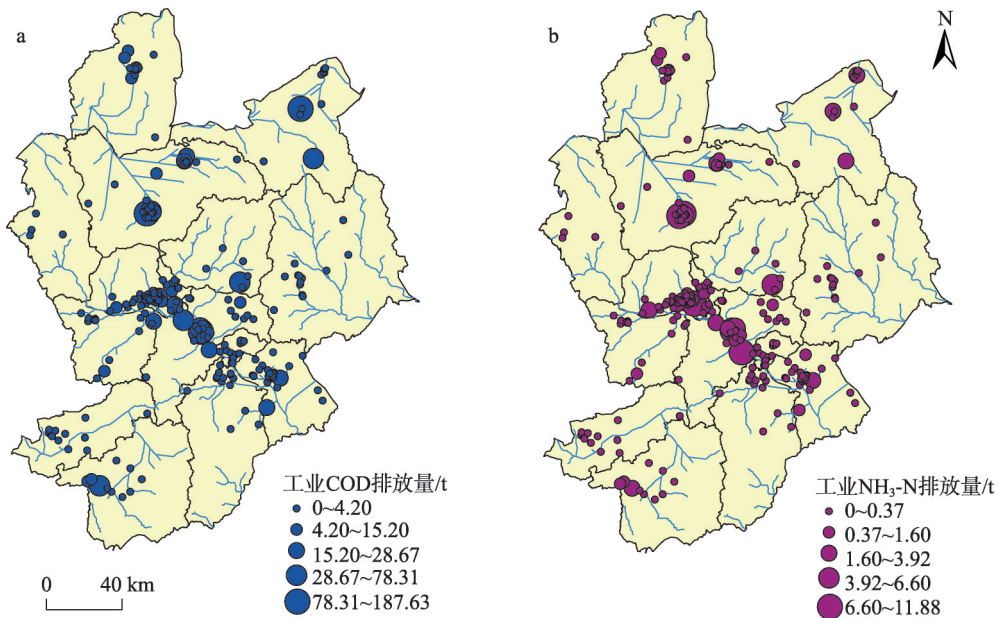


图1 张家口市各区县工业点源及其污染负荷空间分布

Fig. 1 Spatial distribution of industrial point sources and pollution loads in Zhangjiakou city

由图1可知,2017年张家口市工业点源集中分布在以主城区(桥东、桥西和经开区)为中心的东南—西北轴上的邻近区县,包括万全、宣化、下花园区和张北、怀来县。张家口市53.75%的工业点都分布在以上地区,其工业COD、NH₃-N排放量分别占张家口市工业COD、NH₃-N排放总量的61.03%和66.87%。

万全区工业点源高度密集,工业点数量达到46个,占整个区域的18.18%,但其COD和NH₃-N排放量分别仅占整个张家口地区的5.17%和8.30%。宣化区和张北县的工业点数量虽大约只有万全区的一半,但其却成为该市的工业COD和NH₃-N排放量大户,2017年这两个地区的工业点源污染负荷分别达到694.50 t和67.41 t,在张家口市工业水污染物排放总量中所占比例达到50%以上。沽源县的工业点只有12个,但其工业COD排放量达212.20 t,占整个张家口地区工业COD排放总量的15.88%,其工业NH₃-N排放量相对较低。

(2) 工业点源各河流水系分布特征

为进一步探讨张家口地区工业点与河流水系的空间分布特征,根据《中华人民共和国河道管理条例》(2018修正版)和《建设项目环境保护管理条例》(2017修订)相关规定,并结合当地实际情况,以0.5 km为缓冲半径对张家口市河流做缓冲分析,将其与整个区域工业点相交,结果显示有40个工业点分布在河流1 km范围内,工业点在永定河水系分布密集。根据表1和图2可知,内陆河水系中分布在河流1 km范围内的工业点有4家,占张家口市工业点的1.58%,其中有2家沿马连渠河(张北县)分布,1家沿黑水河(张北县)分布,1家沿张玉声河(康保县)分布。滦河水系中分布在河流1 km范围内的工业点只有5家,且都沿闪电河分布,占张家口市工业点的1.98%。永定河水系中分布在河

流1 km范围内的工业点最多,有31家,占张家口市工业点的12.25%,其中有3家沿清水河分布,有22家沿洋河分布,有2家沿桑干河分布,有4家沿永定河分布。结合图1、图2可以发现,永定河水系工业点分布最为密集,且沿洋河呈现带状分布;工业NH₃-N排放大户主要分布在洋河和马连渠河,工业COD排放大户主要分布在洋河、马连渠河和闪电河。

2.1.2 工业点源污染负荷空间集聚特征

结合图1从工业点源污染负荷的空间集聚度来看,工业点源COD和NH₃-N排放量的集聚性空间差异显著,尚义县、阳原县和赤城县整体上几乎没有密集型工业点源污染物分布,工业点源污染物排放高密度区主要集中在张北县、宣化区和万全区,高密度区分布具有临河性、临城性,北部县域高密度区呈点状分布,中部区县高密度区大致沿洋河呈带状分布。

为进一步分析工业点源污染负荷的集中分布区,借助ArcGIS 10.0软件,使用空间自相关中Getis-Ord G_i^* 热点分析工具分别对2017年张家口市253个工业点的COD、NH₃-N排放量进行分析,得到张家口市工业点源污染负荷热点分析图(图3)。

从图3可以看出,张家口市工业点源COD和NH₃-N排放量的冷热点在空间上具有相对一致性,整体上呈东南部冷西北部热。工业点源COD排放量在张北县南部、沽源县南北部、宣化区中部呈现高值—高值集聚,即“热点区”;而在怀来县西北部、下花园区南部呈现低值—低值集聚,即“冷点区”;工业点源NH₃-N排放量在宣化区中部和张北县南部呈现高值—高值集聚,即“热点区”;而在怀来县西北部呈现低值—低值集聚,即“冷点区”。其余地区工业点源污染负荷集聚现象不显著。

2.2 主要工业点源空间分布格局

结合《国民经济行业分类》(2019年修订版)和《固定污染源排污许可分类管理名录(2017年版)》^[29],综合考虑张家口市各行业COD和氨氮排放总量,以各行业COD排放总量作为划分依据,将其分为重度污染行业(COD emission/t≥150)、中度污染行业(70≤COD emission/t≤150)和轻度污染行业(20≤COD emission/t≤70),选择该市污染负荷较高的160个行业工业点作为主要工业点源。其中,重度污染行业包括C14食品制造业、C31黑色金属冶炼及压延加工业和C13农副食品加工业;中度污染行业包括B06煤

表1 张家口市各区县工业点源与河流水系的空间关系

Table 1 Spatial relationship between industrial point source and river system in Zhangjiakou city

主要河流水系	工业点数量比例/%	工业点源数/个
内陆河水系	马连渠河0.79; 黑水河0.40; 张玉声河0.40	4
滦河水系	闪电河1.98	5
永定河水系	清水河1.19; 洋河8.70; 桑干河0.79; 永定河1.58	31

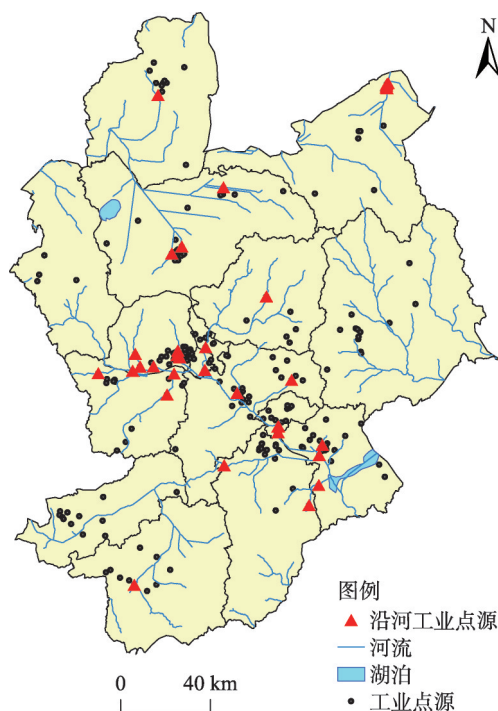


图2 张家口市各区县工业点源与河流水系空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of industrial point sources and river systems in Zhangjiakou city

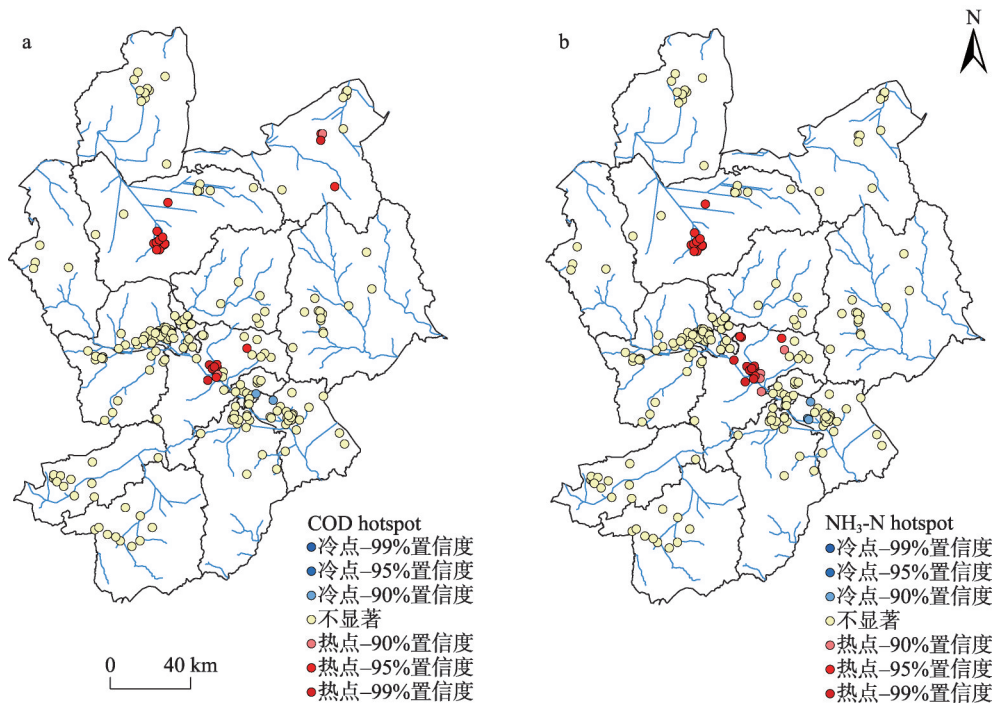


图3 张家口市工业点源污染负荷热点分析

Fig. 3 Hotspot analysis of industrial point source pollution loads in Zhangjiakou

炭开采和选洗业、B09有色金属矿采选业、C15酒、饮料和精制茶制造业和D44电力、热力的生产和供应业；轻度污染行业包括C26化学原料及化学制品制造业、C36汽车制造业、C35专用设备制造业和C34通用设备制造业。

2.2.1 不同污染程度行业工业点源空间分布格局

(1) 重度污染行业工业点源空间分异

重度污染行业有66个工业点，其中C13有36家、C31有10家、C14有20家。以工业COD和NH₃-N排放量作为自然断裂法的分割指标对这66个工业点的污染负荷进行等级划分，得到图4。

总体来看，C13、C14和C31主要临河、临城分布，C13主要分布于坝上内陆河水系（康保、张北县）和滦河水系（沽源县），C14与C31集中分布在南部坝下低山盆间地区、永定河水系中的万全区。其中，重度污染行业工业点在永定河水系中流经主城区的洋河流域工业点分布最为聚集，并形成狭长型带状分布，在内陆河水系形成簇团状分布。C13排污大户主要集中在内陆河水系和滦河水系，分布在永定河水系中的工业点排污量相对较小；C14排污大户主要集中在马连渠河和永定河官厅水库附近，沿洋河分布的工业点排污量相对较小；C31排污大户主要集中在洋河，该行业其他工业点源主要分布在洋河上游，排污量小。重度污染行业用水量较大，为便于生产且接近市场，工业点大多临河、临城集中分布，并在洋河流域形成带状分布。总体来看，重度污染行业工业COD和NH₃-N排放大户都集中分布在马连渠河、闪电河和洋河（张北、沽源、怀来县和宣化区）。

从重度污染行业工业污染负荷来看，C13的COD和NH₃-N排放量都远高于其他两个行业，成为污染负荷最重的行业；C31的COD排放量与C14相差不大，但其NH₃-N排放

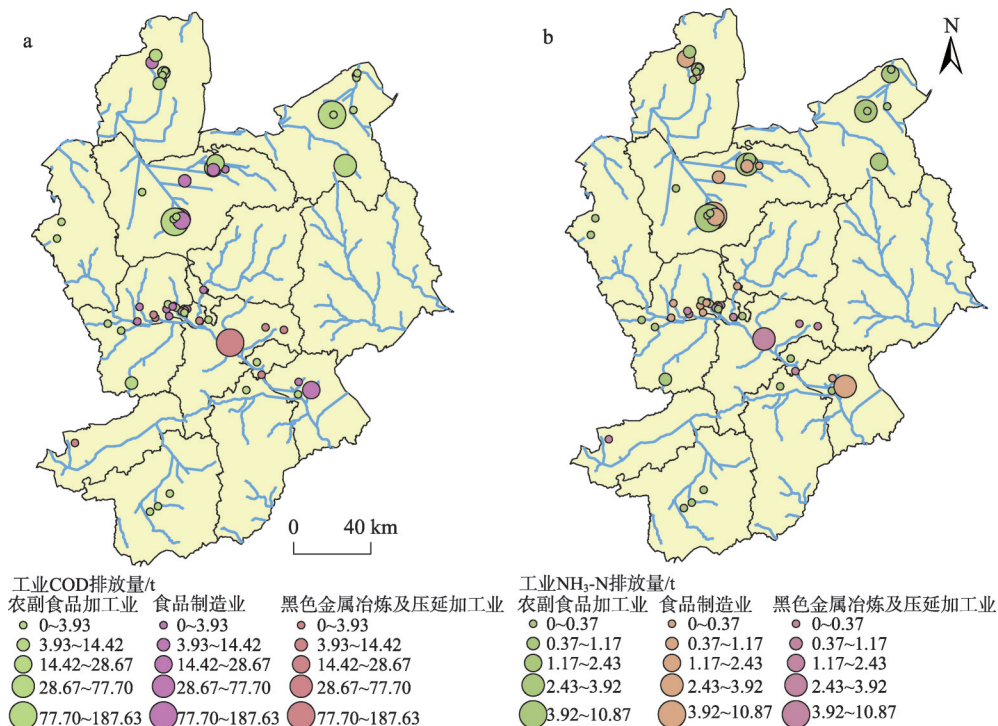


图4 张家口市重度污染工业点源分布

Fig. 4 Spatial distribution of heavily polluting industrial point sources in Zhangjiakou city

量不及C14的六分之一。具体来看, C13的COD排放量最多, 达454.01 t, 占张家口地区工业COD总排放量的33.97%, 排放量最大的工业点位于沽源县; 其次是C31, 其COD排放量占253个工业点COD总排放量的14.08%, 排污大户位于宣化区; C14的COD排放量达165.95 t, 占张家口市工业COD总排放量的12.42%, 排放量最大的工业点位于张北县。C13作为NH₃-N排放最多的行业, 该排放量在所有工业点的NH₃-N排放量中所占比例为21.26%, 排放量最大的工业点位于张北县; 其次是C14, NH₃-N排放量为20.59 t, 排污大户位于张北县; C31的NH₃-N排放量在重度污染行业中相对较少, 排放量相对最大的工业点位于宣化区。

(2) 中度污染行业工业点源空间分异

中度污染行业有62个工业点, 其中C15有15家、D44有33家、B06有5家、B09有9家。从张家口市中度污染工业点源分布图看(图5), 中度污染行业主要临河、临城、临水库分布, 集中分布在南部坝下低山盆间地区、永定河水系, 并在洋河流域形成带状集中分布。其中, B06集中分布在蔚县, D44和C15均在怀来县有集中分布, B09零星分布于东北部各区县。B09排污大户主要集中在永定河水系中的清水河, 在潮白河水系中分布的工业点排污量相对较小; D44排污大户主要集中在永定河水系中的洋河流域, 沿马连渠河、桑干河分布的工业点排污量相对较小; B06排污大户主要集中在洋河和壶流河水系; C15排污大户主要集中在洋河, 沿闪电河、马连渠河、桑干河和官厅水库分布的工业点排污量较小。总体来看, 中度污染行业工业COD和NH₃-N排放大户都集中分布在洋河、清水河和壶流河水系(万全区、宣化区和蔚县)。

细看各中度污染行业的污染负荷, B06水污染物排放最多, D44的COD排放量不及

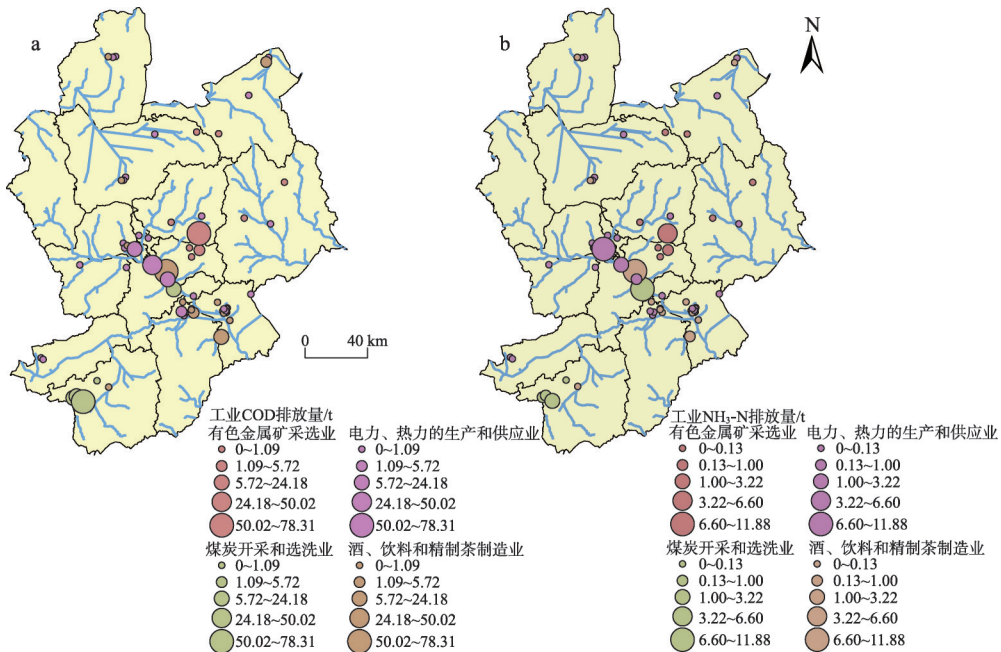


图5 张家口市中度污染工业点源分布

Fig. 5 Spatial distribution of moderately polluting industrial point sources in Zhangjiakou city

C15, 但其NH₃-N排放量仅次于B06, B09的污染负荷在这四个行业中相对较轻。具体来看, B06与C15的COD排放量相差不大, 平均排放量达111.02 t, 约占张家口市工业COD总排放量的8.31%, 排放量最大的工业点分别位于蔚县和宣化区; D44与B09的COD平均排放量达73.76 t, 约占张家口市253个工业点COD排放量的5.52%, 其中D44排放量最大的工业点位于宣化区。B06在四个中度污染行业中NH₃-N排放最多, 达15.71 t, 排放量最大的工业点位于宣化区; 其次是D44, NH₃-N排放量为15.16 t, 排污大户位于万全区; C15的NH₃-N排放量位居第三, 在全市253个工业点NH₃-N排放量中所占比例为10.32%, 排污大户位于经开区; 这四个中度污染行业中NH₃-N排放量最小的是B09, 其NH₃-N排放量不到10 t。

(3) 轻度污染行业工业点源空间分异

轻度污染行业有32个工业点, 其中C26有10家、C36有2家、C35有12家、C34有8家。从张家口市轻度污染工业点源分布图看(图6), 轻度污染行业主要集中分布在南部坝下低山盆间地区、永定河水系中的万全区, 并在洋河与清水河交汇处形成组团式分布格局。C36排污大户位于流经怀安县的洋河区域; C35排污大户主要集中在清水河, 沿洋河、桑干河分布的工业点排污量相对较小; C26排污大户主要集中在洋河, 清水河和桑干河流域有少许工业点分布, 且排污量小; C34排污大户主要集中在洋河, 清水河分布较少, 但排污量大。总体来看, 轻度污染行业工业COD和NH₃-N排放大户都集中分布在洋河与清水河交汇处(宣化区、经开区和万全区)。

细看各轻度污染行业的污染负荷, C36的COD排放最大, C26的NH₃-N排放大, 轻度污染行业COD排放量都不超过35 t, NH₃-N排放量都低于5 t, 污染负荷较轻。具体来看, C36的COD排放量达34.44 t, 但在张家口市工业COD总排放量中仅占2.58%; 该行

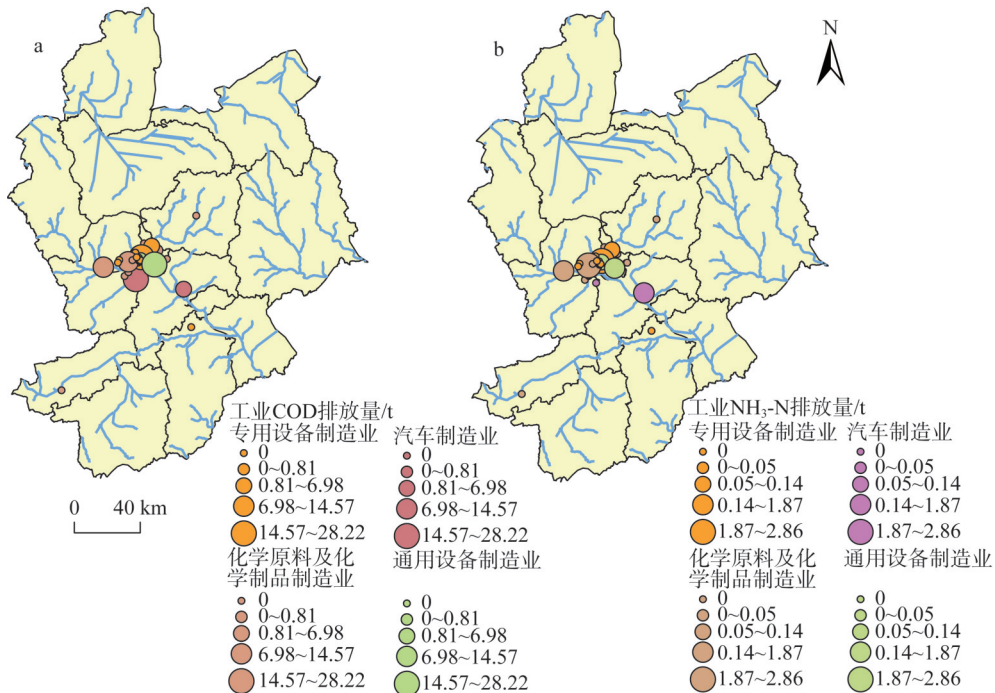


图6 张家口市轻度污染工业点源分布

Fig. 6 Spatial distribution of slightly polluting industrial point sources in Zhangjiakou city

业NH₃-N排放量在全市253个工业点NH₃-N排放量所占比例仅为1.23%，且万全区该行业污染负荷最重；其次是C35，该行业COD和NH₃-N排放量都较高，分别占张家口市工业COD和NH₃-N总排放量的2.43%和2.46%，该行业在万全区排污量最大；C26在万全区污染负荷最重，其COD排放量为26.39 t，NH₃-N排放量最高。

2.2.2 不同规模工业点源空间分布格局

在这160个污染负荷较高的行业工业点源中，主要以中小型企业为主，其中大型企业13家，中型企业30家，小型企业100家，微型企业17家。从张家口市不同规模工业点源空间分布图看（图7），大型企业在坝上分布有2家，坝下分布有11家，主要集中分布在南部坝下低山盆间地区、永定河水系中的宣化区和蔚县，坝上内陆河水系中的张北县和坝下永定河水系中的万全、下花园区和怀安、怀来县均有零星分布；中型企业在坝上分布有12家，坝下分布有18家，主要分布在坝下永定河水系中的张家口市市辖区，以主城区为中心向西部、东部及东南部呈散点状分布，坝下内陆河水系中的张北县中型规模工业点分布最多，坝上康保县和滦河水系中的沽源县有少量分布；小型企业在坝上分布有21家，坝下分布有79家，主要分布在南部坝下永定河水系中的万全区，其次小型企业分布最多的地区是怀来县，坝上四县的小型企业呈组团式分布，坝下潮白河水系中的赤城县零星分布3家小型企业；微型企业在坝上分布有8家，坝下分布有9家，主要集中分布在坝下永定河水系中流经万全区、怀安县的洋河沿线和流经经开区的清水河沿线，坝上内陆河水系中的康保县和张北县。

结合图7和表2可知，有7家大型企业沿洋河在西北—东南向呈串珠式线状分布，以D44电力、热力的生产和供应业为主，有3家大型企业集中分布在壶流河蔚县段壶流河水

库附近,以B06煤炭开采和选洗业为主;有8家中型企业在洋河与清水河交汇处呈簇团状分布,以C26化学原料及化学制品制造业为主,有4家中型企业集中分布在张北县海子洼水库附近,以C14食品制造业为主;有31家小型企业在流经万全区境内的洋河沿线呈集中团状分布,以C14食品制造业和C35专用设备制造业为主,有8家小型企业集中分布在桑干河涿鹿县段桦林沟水库附近,以C15酒、饮料和精制茶制造业为主,有8家小型企业集中分布在官厅水库,以D44电力、热力的生产和供应业为主,有17家小型企业在内陆河水系中的黄盖淖、海子洼、南壕堑、石头城、青年水库以及滦河水系中的闪电河水库等水资源充足的地方均有集中分布,主要以C13农副食品加工业为主;有6家微型企业集中分布在河流下游、康保县政府周边,以C13农副食品加工业为主,接近水源和市场,有3家微型企业分布在洋河万全区段,以C35、C34设备制造业为主。

2.2.3 主要工业点源与水环境空间关系

不同污染程度行业工业点源的分布在空间上具有相对一致性。重度污染行业COD和NH₃-N排放量分别占该市工业COD和氨氮总排放量的60.47%和40.70%;中度污染行业COD和NH₃-N排放量分别占该市工业COD和氨氮总排放量的27.65%和41.26%;轻度污染行业COD和NH₃-N排放量分别占该市工业COD和氨氮总排放量的8.68%和8.55%。各行业工业点源分布具有临河性、临城性,主要沿洋河分布,并且主要集聚在主城区(洋河和清水河交汇处),呈带状和簇团状格局,南北部河流和县域有零星分布,洋河水环境

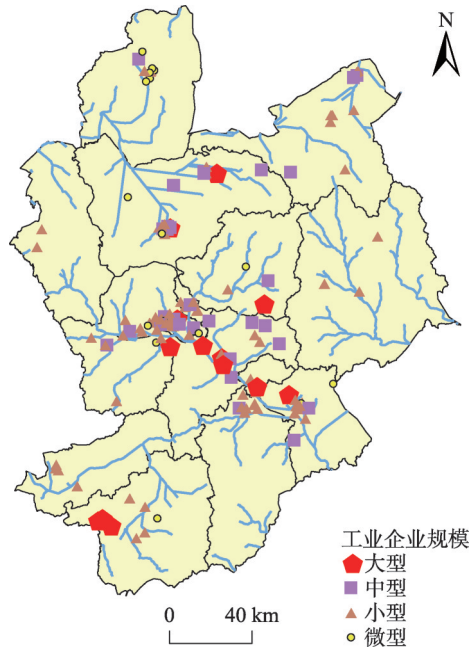


图7 张家口市不同规模工业点源空间分布
Fig. 7 Spatial distribution of industrial point sources of different scales in Zhangjiakou city

表2 张家口市不同规模工业点源行业结构分析

Table 2 Industrial structure of industrial point sources of different scales in Zhangjiakou city

工业企业规模	地区(工业点数量/个)	行业(工业点数量/个)
大型	宣化区(3)、蔚县(3)、张北县(2)	D44(3)、B06(3)、C31(1)、C13(1)
	下花园区(1)、怀安县(1)、万全区(1)	C36(1)、C35(1)、C14(1)、C15(1)
	怀来县(1)、崇礼区(1)	B09(1)
中型	张北县(8)、宣化区(5)、万全区(4)	C14(6)、D44(5)、C13(4)、B09(4)
	沽源县(3)、经开区(2)、怀来县(2)	C26(3)、C34(2)、C15(2)、C31(1)
	涿鹿县(1)、崇礼区(1)、康保县(1)	C35(1)、B06(1)、C36(1)
	怀安县(1)、桥东区(1)、桥西区(1)	
小型	万全区(31)、怀来县(12)、涿鹿县(8)	C13(24)、D44(22)、C14(12)、C15(11)
	张北县(8)、沽源县(8)、怀安县(5)	C35(9)、C31(8)、C26(5)、C34(4)
	阳原县(4)、蔚县(4)、赤城县(3)	B09(4)、B06(1)
	桥西区(3)、宣化区(3)、康保县(3)	
	下花园区(2)、尚义县(2)、桥东区(2)	
	崇礼区(1)、经开区(1)	
微型	康保县(6)、张北县(2)、万全区(3)	C13(7)、D44(3)、C26(2)、C34(2)
	怀来县(2)、蔚县(1)、怀安县(1)	C14(1)、C15(1)、C35(1)
	崇礼区(1)、经开区(1)	

压力巨大。

不同类型工业点源的分布具有空间异质性。C13、C14和C15等原料和市场导向型行业主要集中分布在永定河水系,并沿洋河形成串联型带状分布,C13和C14排污大户主要分布在北部张北县和沽源县,其水污染物排放量对内陆河水系造成一定影响,C15排污大户主要分布在怀来县西部,官厅水库附近工业集聚,水环境压力大。C31、B06、B09、D44等资源和动力导向型行业集中分布在资源丰富的宣化区、万全区、蔚县等特定区县,其排污量对清水河造成影响,B06排污大户聚集在壶流河水库,该行业排放的大量污水对临近水库、河流的影响巨大。

不同规模工业点源的分布存在空间差异的同时也呈现出空间相对一致性。总的来看,大型、中型、小型和微型企业都主要集中分布在坝下永定河水系,其次是内陆河水系,大中型企业数量不多却是水环境问题的主要“贡献者”。其中,洋河万全区段、桑干河涿鹿县段中小型企业分布最为集中,洋河宣化区段、安固里河张北县段大中型企业分布最多,壶流河蔚县段大型企业聚集度高。大型企业数量不多,但其COD和NH₃-N排放量却分别占该市工业COD和氨氮总排放量的35.12%和17.44%,主要分布在永定河水系中的洋河沿线,在壶流河水库附近也有集中分布,洋河和壶流河水库污染负荷重;中型企业COD和NH₃-N排放量分别占该市工业COD和氨氮总排放量的33.23%和53.22%,主要分布在永定河水系中的洋河、清水河、官厅水库周边,内陆河水系中水库、河流下游有零星分布;小型企业数量最多且集中分布在流经万全区的洋河沿线,内陆河水系、滦河水系和潮白河水系中分布较少,其COD和NH₃-N排放量分别占该市工业COD和氨氮总排放量的26.99%和19.59%;微型企业数量不多且水污染物排放量少,在内陆河水系和永定河水系中的洋河、清水河出现簇团状集中分布,对附近河流污染较轻。

3 结论与讨论

3.1 结论

(1) 张家口市各区县工业点源集中分布在万全、宣化、下花园区和张北、怀来县。COD排放大户主要位于沽源县和张北县,COD排放量超过200 t;NH₃-N排放大户主要位于宣化区和张北县,NH₃-N排放量超过20 t。

(2) 工业点源在永定河水系分布最多,并在洋河流域形成带状分布,其次是内陆河水系,潮白河与滦河水系分布较少。

(3) 张家口市工业点源污染负荷的集聚性空间差异显著,工业点源污染物排放高密度区主要集中在张北县、宣化区和万全区,高密度区分布具有临河性、临城性;工业点源污染负荷的冷热点在空间上具有相对一致性,整体上呈东南部冷西北部热。工业点源COD和NH₃-N排放量在张北县南部、宣化区中部均呈现高值—高值集聚,即“热点区”;在怀来县西北部均呈现低值—低值集聚,即“冷点区”。

(4) 不同规模、不同类型工业点源的分布存在空间差异的同时也呈现出空间相对一致性。大型、中型、小型和微型企业都主要集中分布在坝下永定河水系,其次是内陆河水系。重度污染行业集中排放源分布在张北、沽源和康保县,轻度污染行业集中排放源分布在坝下永定河水系中洋河与清水河交汇处(宣化、经开和万全区),中型企业数量不

多确实水环境问题的主要“贡献者”。大型企业主要分布在洋河宣化区段和壶流河蔚县段,以电力、热力的生产和供应业和煤炭开采和选洗业为主;中型企业主要分布在洋河、清水河沿线,以食品制造业为主;小型企业集中分布在洋河万全区段,微型企业集中分布在内陆河水系中的康保县,小型和微型企业都以农副食品加工业为主。

(5) 为寻求最佳区位条件形成不同类型的工业点源分布格局。农副食品加工业与酒、饮料和精制茶制造业等原料和市场导向型行业主要集中分布在洋河流域且靠近城区,黑色金属冶炼及压延加工业与电力、热力的生产和供应业等资源 and 动力导向型行业集中分布在资源丰富的宣化区、万全区、蔚县等特定区县。

3.2 讨论

永定河水系中洋河沿线工业点分布最为密集,在万全区东南部、宣化区中部、下花园区西部与怀来县西北部形成工业集聚,工业点源呈簇团状分布形态。过多的工业点源集聚对水资源的需求量增大,大量的水污染物排放加重了对临近河流的污染,永定河水系河流纳污能力有限,洋河水环境压力尤为巨大。

地区工业点源数量与其污染负荷不成正比关系,万全区工业点分布最多,但其污染负荷较轻,该地区以专用设备和通用设备制造业等低污染低排放行业为主。张北县和宣化区工业点源数量远不及万全区,但却成为该市工业污染负荷最重的地区,通过对宣化区的黑色金属冶炼及压延加工业、酒、饮料和精制茶制造业以及电力、热力的生产和供应业,张北县的农副食品加工业和食品制造业这些污染负荷较重的行业进行产业优化调整,降低高污染高消耗高排放行业比例,延长产业链,加强行业水污染排放管理,这对减轻洋河和马连渠河的水污染问题有着重要意义。近年来,张家口市高度重视水环境治理工作,引导产业绿色发展,推进治理工业污染,深化流域水污染防治,全市水环境质量正持续改善。

重度污染行业工业 COD 和 $\text{NH}_3\text{-N}$ 集中排放源分布在张北、沽源、怀来县和宣化区,但宣化区和张北县的工业产值远高于沽源县和怀来县,这与各区县所分布的工业点数量没有直接关系,与企业规模和行业类别有关。宣化区和张北县拥有大型企业,且以中小型企业为主,电力、热力的生产和供应业与黑色金属冶炼及压延加工业工业点少但对宣化区工业产值贡献最大,食品制造业和农副食品加工业工业点少但对张北县工业产值贡献最大;怀来县虽有一家大型企业(酒、饮料和精制茶制造业),但工业产值低,以小型企业为主,电力、热力的生产和供应业工业点多却产值少;沽源县没有大型企业,以小型企业为主,农副食品加工业工业点多但产值一般。怀来县今后应立足当地葡萄酒产业优势,做大做强葡萄酒产业,着力发展以葡萄酒产业为核心的大型企业,发挥其龙头企业引领带动作用,促进相关产业的发展;同时可加强完善葡萄酒庄和葡萄酒泉等文旅和康养产业的发展,以酒文化带动第三产业的发展。沽源县今后应继续依托当地的蔬菜、马铃薯、畜牧这三大资源优势,加快将实力强、产业基础雄厚的中型企业发展为大型企业,同时推广精致高效的农业发展模式,提升农业现代化经营水平,如规划建设现代农业园区和规模养殖场等。

本文只是对张家口市工业点源空间分布格局与污染负荷特征进行了研究分析,尚未涉及该地区第一产业和第三产业的污染负荷对水环境的影响,也没有深入探讨如何通过

产业优化减排来缓解水环境压力, 这将是本文今后需要进一步研究的。

参考文献(References):

- [1] 陈祖海, 雷朱家华. 中国环境污染变动的时空特征及其经济驱动因素. 地理研究, 2015, 34(11): 2165-2178. [CHEN Z H, LEI Z J H. The spatial-temporal characteristics and economic drivers of environmental pollution changes in China. Geographical Research, 2015, 34(11): 2165-2178.]
- [2] SELDEN T M, SONG D S. Environmental quality and development: Is there a Kuznets Curve for air pollution emissions. Journal of Environmental Economics and Management, 1994, 27(2): 147-162.
- [3] HETTIGE H, MANI M, WHEELER D. Industrial pollution in economic development: The environmental Kuznets Curve revisited. Journal of Development Economics, 2000, 62(2): 445-476.
- [4] COCA J, PADILLA E, FARRE M, et al. Economic growth and atmospheric pollution in Spain: Discussing the environmental Kuznets Curve hypothesis. Ecological Economics, 2001, 39(1): 85-99.
- [5] 李飞, 董锁成, 李泽红. 中国经济增长与环境污染关系的再检验: 基于全国省级数据的面板协整分析. 自然资源学报, 2009, 24(11): 1912-1920. [LI F, DONG S C, LI Z H. The re-estimation of relationship between economic growth and environmental pollution in China: A panel co-integration analysis. Journal of Natural Resources, 2009, 24(11): 1912-1920.]
- [6] WANG S J, FANG C L, WANG Y. Spatiotemporal variations of energy-related CO₂ emissions in China and its influencing factors: An empirical analysis based on provincial panel data. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2016, 55(1): 505-515.
- [7] 杜鑫, 许东, 付晓, 等. 辽河流域辽宁段水环境演变与流域经济发展的关系. 生态学报, 2015, 35(6): 1955-1960. [DU X, XU D, FU X, et al. An empirical research on the relationship between water environment and economic development in Liaohe River Watershed. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(6): 1955-1960.]
- [8] 王莉雯, 卫亚星. 沈阳市经济发展演变与碳排放效应研究. 自然资源学报, 2014, 29(1): 27-38. [WANG L W, WEI Y X. The research on economic development and carbon emission effect of Shenyang. Journal of Natural Resources, 2014, 29(1): 27-38.]
- [9] 魏龙, 潘安. 出口贸易和FDI加剧了资源型城市的环境污染吗: 基于中国285个地级城市面板数据的经验研究. 自然资源学报, 2016, 31(1): 17-27. [WEI L, PAN A. Do export and FDI aggravate environmental pollution in resources-based cities: An empirical analysis based on panel data of 285 prefecture cities in China. Journal of Natural Resources, 2016, 31(1): 17-27.]
- [10] 戎丽丽, 胡继连. 区域经济增长与水资源环境协调发展的脱钩状况评价: 基于山东省的实证分析. 价格理论与实践, 2016, (12): 192-195. [RONG L L, HU J L. Evaluation on the decoupling between regional economic growth and water resources environment: Based on the empirical analysis of Shandong province. Price: Theory & Practice, 2016, (12): 192-195.]
- [11] 章恒全, 陈卓然, 张陈俊. 长江经济带工业水环境压力与经济增长脱钩努力研究. 地域研究与开发, 2019, 38(2): 13-18, 30. [ZHANG H Q, CHEN Z R, ZHANG C J. Decoupling efforts of environmental pressure of industrial wastewater and economic growth in Yangtze River Economic Belt. Areal Research and Development, 2019, 38(2): 13-18, 30.]
- [12] 周孝德, 李怀恩. 渭河流域工业发展与水环境质量趋势分析. 水资源保护, 2001, (1): 18-20, 60. [ZHOU X D, LI H E. Trend analysis on water environmental quality and industrial development in Weihe River Basin. Water Resources Protection, 2001, (1): 18-20, 60.]
- [13] 李啸虎, 杨德刚. 水足迹视角下干旱区城市工业结构优化研究: 以乌鲁木齐市为例. 中国人口·资源与环境, 2015, 25(5): 170-176. [LI X H, YANG D G. Structure optimization of urban industry in arid land based on water footprint: A case study of Urumqi. China Population, Resources and Environment, 2015, 25(5): 170-176.]
- [14] HOSSEIN H M, KANEKO S. Can environment quality spread through institutions?. Energy Policy, 2013, 56(2): 312-321.
- [15] FRANK A, MOUSSIOPOULOS B N, BARTONOVAC A, et al. Urban air quality in larger conurbations in the European Union. Environmental Modelling & Software, 2001, 16(4): 399-414.
- [16] 赵小风, 黄贤金, 张兴榆, 等. 区域COD、SO₂及TSP排放的空间自相关分析: 以江苏省为例. 环境科学, 2009, 30(6):

- 1580-1587. [ZHAO X F, HUANG X J, ZHANG X Y, et al. Application of spatial autocorrelation analysis to the COD, SO₂ and TSP emission in Jiangsu province. *Environmental Science*, 2009, 30(6): 1580-1587.]
- [17] 张静, 段扬, 张伟, 等. 京津冀区域工业水污染排放空间密度特征研究. *生态环境学报*, 2018, 27(1): 115-121. [ZHANG J, DUAN Y, ZHANG W, et al. Spatial density estimation on the industrial water pollution emission in Beijing-Tianjin-Hebei region. *Ecology and Environment*, 2018, 27(1): 115-121.]
- [18] 徐林清, 聂楠. 污染物排放的空间集聚及其影响因素: 基于岭回归模型的分析. *生态经济*, 2015, 31(5): 160-165. [XU L Q, NIE N. Spatial agglomeration and influencing factors of pollutant emissions: The analysis based on Ridge Regression Model. *Ecological Economy*, 2015, 31(5): 160-165.]
- [19] 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. *地理学报*, 2016, 71(11): 1911-1925. [ZHOU K, FAN J. 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.]
- [20] CHAPMAN K. The incorporation of environmental considerations into the analysis of industrial agglomerations: Examples from the petrochemical industry in Texas and Louisiana. *Geoforum*, 1983, 14(1): 37-44.
- [21] 王兵, 聂欣. 产业集聚与环境治理: 助力还是阻力: 来自开发区设立准自然实验的证据. *中国工业经济*, 2016, (12): 75-89. [WANG B, NIE X. Industrial agglomeration and environmental governance: The power or resistance: Evidence from a quasi-natural experiment of establishment of the development zone. *China Industrial Economics*, 2016, (12): 75-89.]
- [22] 苏李, 乔娟. 产业集聚发展与环境污染关系的考察: 来自中国制造业的证据. *科学学研究*, 2011, (1): 79-85. [SU L, QIAO J. The exploration of the relationship between the industrial agglomeration's developments and the environmental pollution: The evidence from the manufacturing in China. *Studies in Science of Science*, 2011, (1): 79-85.]
- [23] 高爽, 魏也华, 陈雯, 等. 发达地区制造业集聚和水污染的空间关联: 以无锡市区为例. *地理研究*, 2011, 30(5): 902-912. [GAO S, WEI Y H, CHEN W, et al. Study on spatial-correlation between water pollution and industrial agglomeration in the developed region of China: A case study of Wuxi city. *Geographical Research*, 2011, 30(5): 902-912.]
- [24] 蒋海兵, 徐建刚. 江苏淮河流域工业点源负荷空间分布特征研究. *长江流域资源与环境*, 2016, 22(6): 742-749. [JIANG H B, XU J G. Spatial distribution feature of industrial point source in Jiansu Huaihe River Basin. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2016, 22(6): 742-749.]
- [25] 徐清华. 长三角制造业集聚对环境污染的影响研究. 上海: 上海师范大学, 2018. [XU Q H. Study of the influence of manufacturing agglomeration on environmental pollution in the Yangtze River Delta. Shanghai: Shanghai Normal University, 2018.]
- [26] 周侃, 王强, 樊杰. 经济集聚对区域水污染物排放的影响及溢出效应. *自然资源学报*, 2019, 34(7): 1483-1495. [ZHOU K, WANG Q, FAN J. Impact of economic agglomeration on regional water pollutant emissions and its spillover effects. *Journal of Natural Resources*, 2019, 34(7): 1483-1495.]
- [27] 张文艺. GIS缓冲区和叠加分析. 长沙: 中南大学, 2009. [ZHANG W Y. GIS buffer and overlay analysis. Changsha: Central South University, 2009.]
- [28] 董鹏宇, 赵华甫. 耕地多功能权衡与协同关系研究: 以上海市青浦区为例. *长江流域与环境*, 2019, 28(2): 368-372. [DONG P Y, ZHAO H F. Study on trade-off and synergy relationship of cultivated land multifunction: A case of Qingpu district, Shanghai. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2019, 28(2): 368-372.]
- [29] 中国物资再生协会. 环境保护部规划财务司有关负责人就《固定污染源排污许可分类管理名录(2017年版)》有关问题答记者问. *中国资源综合利用*, 2017, 35(8): 2-5. [China Material Recycling Association. Officials from the planning and finance department of the ministry of environmental protection answered questions on the catalogue of classified management of pollutant discharge permits for fixed sources (2017 edition). *China Resources Comprehensive Utilization*, 2017, 35(8): 2-5.]

Spatial distribution of sewage industrial point in Zhangjiakou city

ZHONG Jia^{1,2}, YU Hui¹, LIU Shao-quan¹

(1. Institute of Mountain Hazards and Environment, CAS, Chengdu 610041, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: This research analyzes the spatial distribution pattern of industrial point sources and pollution loads in Zhangjiakou city, a central city in the northwest of Heibei province by buffer analysis and hotspot analysis, based on sewage industrial point source information database. The results show that: (1) Industrial point sources are concentrated in neighboring districts on the southeast- west axis of the main urban area. The industrial point source pollution of Zhangbei county and Xuanhua district are the heaviest. (2) Industrial point sources are mostly distributed in the Yongding River system, presenting a banded distribution in the Yanghe River Basin. The high load of water pollutant of industrial point sources is near the river and the city, and high density areas of pollutant discharge are concentrated in Zhangbei county, Xuanhua district and Wanquan district. (3) The large, medium, small and micro enterprises are mainly concentrated in the Yongding River system under the dam, followed by the inland river system. Major emitters of heavily polluting industries are mainly located in Zhangbei, Guyuan and Kangbao county, and major emitters of light pollution industries are concentrated in the intersection of Zhongyang River and Qingshui River in the Yongding River system under the dam. By analyzing the spatial distribution pattern of industrial point sources and their pollution load characteristics, this study can provide guidance for government departments to adjust planning industries and focus on water polluted areas.

Keywords: Zhangjiakou city; industrial point source; spatial distribution; buffer analysis; hotspot analysis