



以深圳市为例的超大型城市工业废水排放特征分析

孙敬锋¹, 高晨宇¹, 李静思², 李红桔³, 尹娟³, 赵鑫³

(1. 深圳市生态环境技术审查中心, 广东深圳 518034;

2. 深圳市山水乐环保科技有限公司, 广东深圳 518172;

3. 深圳市广汇源环境水务有限公司, 广东深圳 518003)

[摘要] 基于环境统计数据研究了深圳市工业水污染物的行业排放特点及空间分布特征。结果表明, 深圳市纳入环境统计涉水污染物排放的工业企业共 1 104 家, 行业覆盖生物质能发电、电子电路制造、金属表面处理及热处理加工等共 173 个。COD、NH₃-N、TN 3 种常规水污染物综合评价结果与其空间排放特征基本一致。非常规水污染物中, 金属表面处理及热处理加工行业的石油类和废水总铬污染物排放量最大, 涂料行业的挥发酚排放量最大, 半导体分立器件制造的氰化物排放量最大。利用第二次全国污染源普查数据对国内超大型工业城市进行对比分析, 结合深圳市产业结构及工业污染控制措施, 可知深圳市工业企业污染排放控制效果较好。针对深圳市工业废水污染排放及分布特征, 提出相关污染控制及产业发展建议, 为管理部门提供参考。

[关键词] 水污染物; 排放特征; 空间分布; 环境污染综合评价指数

[中图分类号] X703 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1005-829X(2023)01-0032-08

Analysis on the characteristics of industrial wastewater discharge in super-large cities: taking Shenzhen as an example

SUN Jingfeng¹, GAO Chenyu¹, LI Jingsi², LI Hongju³, YIN Juan³, ZHAO Xin³

(1. Shenzhen Ecological Environment Technology Review Center, Shenzhen 518034, China;

2. Shenzhen Shanshui Le Environmental Protection Technology Co., Ltd., Shenzhen 518172, China;

3. Shenzhen Guanghuiyuan Environment Water Co., Ltd., Shenzhen 518003, China)

Abstract: Based on environmental statistical data, the industry discharge characteristics and spatial distribution characteristics of industrial water pollutants in Shenzhen were studied. The results showed that there were 1 104 industrial enterprises involved in the discharge of water pollutants included in the environmental statistics in Shenzhen, covering a total of 173 industries including biomass power generation, electronic circuit manufacturing, metal surface treatment and heat treatment processing. The comprehensive evaluation results of COD, NH₃-N and TN three conventional water pollutants were basically consistent with their spatial emission characteristics. Among the unconventional water pollutants, the metal surface treatment and heat treatment processing industries have the largest emissions of petroleum and total chromium pollutants, the paint industry had the largest emissions of volatile phenols, and the semiconductor discrete device manufacturing industry had the largest emissions of cyanide. Using the data of the second national census of pollution sources to compare and analyze domestic super-large industrial cities, combined with Shenzhen's industrial structure and industrial pollution control measures, it can be seen that Shenzhen's industrial enterprises have better pollution control effects. According to the characteristics of industrial wastewater pollution discharge and distribution in Shenzhen, relevant pollution control and industrial development suggestions were put forward to provide reference for the management department.

Key words: water pollutants; emission characteristics; spatial distribution; environmental performance index(EPI)

工业废水是我国废水排放的主要来源, 根据环境统计公报, 2019 年我国工业废水的产生(治理)量

占全部废水产生(治理)量的37%。工业废水成分复杂,含有大量的重金属、氟化物、氰化物、氮、磷等污染物质,流入水体会造成环境中污染物的种类和浓度增加,造成严重的、不可逆的污染^[1],威胁生态环境安全。若此类废水进入饮水区被人误饮,会严重威胁人类健康^[2],因此工业废水已成为亟待解决的重大环境问题之一^[3]。

目前,工业废水仍然是深圳市主要的污染物排放源,显著影响着周边的水环境质量与环境安全^[4]。随着经济的快速发展,深圳市水污染排放量不断增加,处理压力不断增大^[5-6]。自20世纪90年代以来,国内外众多学者开始对环境污染、技术创新和产业结构的关系进行研究^[7]。王青等^[8]运用Granger因果检验方法分析产业结构对环境污染的影响,发现工业产业是影响环境污染的最大因素。G. M. GROSSMAN等^[9]分析了环境污染的影响因素,发现技术创新在改善环境质量中发挥着重要作用。李斌等^[10]通过对中国37个工业行业2001—2009年的污染排放数据进行分析,发现纯生产技术效应、纯污染治理技术效应在污染减排过程中占据了主导地位,而结构产生技术效应和结构治理技术效应对污染减排起到了促进作用。M. LINDMARK等^[11-12]研究了产业结构与环境污染的关系,发现产业结构的调整能够带来产业间资源的合理分配,使资源得到充分利用从而降低环境污染。王菲等^[13]利用工业结构特征偏向指数和1995—2010年各省29个制造业行业的相关数据,定量分析了工业结构演变与环境变化之间的关系,发现工业结构是影响区域环境质量的重要因素。

上述研究均是从宏观角度泛泛地指出产业结构在一定程度上能够显著影响污染排放及带来的污染负荷量变,缺乏对产业结构整体性和结构性的分析,也未能从超大型工业化城市管理角度出发,从产业规划与布局的层面对污染产生与控制过程进行归纳与探讨。深圳市是工业总产值排名全国第一的超大型工业城市(41 341.32亿元),对其工业污染排放特征的分析具有重要的实践意义。笔者以深圳市为例,利用第二次全国污染源普查数据和环境统计数据分析了深圳市产业结构对水污染物排放总量及环境污染负荷的影响,并与国内其他大城市进行对比,据此提出行之有效的水污染控制建议,为大型工业化城市的水污染管

理与控制提供技术和政策支持。

1 研究方法

1.1 研究范围

本研究选择深圳市辖10个行政区(罗湖区、福田区、南山区、盐田区、龙岗区、宝安区、龙华区、坪山区、光明区、大鹏新区),同时以北京、上海、广州、天津、重庆、武汉、厦门、杭州作为对照城市进行考察。

1.2 数据来源

本研究数据来源于2018年深圳市环境统计数据、第二次全国污染源普查数据。企业行业类别参照《国民经济行业分类》(GB/T 4754—2017)。

1.3 分析方法

收集整理2018年深圳市全市环境统计的数据,将企业按不同行业分类,统计分析各行业COD、NH₃-N、TN 3个常规污染物排放数据以及石油类、挥发酚、氰化物、总铬4个非常规污染物排放数据,进而分析深圳市水污染物的行业排放特征。应用ArcGIS软件对COD、NH₃-N、TN排放进行空间分析,研究其空间分布特点,并计算各区环境污染综合评价指数(EPI)。对比深圳与北京、上海、广州、天津、重庆、武汉、厦门、杭州8个城市第二次全国污染源普查数据,分析深圳市的产业结构和污染控制措施所带来的工业水污染控制效果。

COD、NH₃-N、TN的指标性质、数量级和对环境的影响程度均有差异,笔者采用熵值法^[14]对3种水污染物进行标准化处理,构建深圳市各区环境污染综合评价指数(EPI)^[15-16]。EPI值越小说明污染物综合排放量越大。计算见式(1)~式(5)。

$$x_{i,j} = \frac{X_{\max,j} - X_{i,j}}{X_{\max,j} - X_{\min,j}} + 1 \quad (1)$$

$$R_{i,j} = x_{i,j} \div \sum_{i=1}^m x_{i,j} \quad (2)$$

$$G_j = 1 + \frac{1}{\ln m} \sum_{i=1}^m R_{i,j} \ln R_{i,j} \quad (3)$$

$$w_j = G_j \div \sum_{j=1}^n G_j \quad (4)$$

$$EPI_i = \sum_{j=1}^n w_j \times R_{i,j} \quad (5)$$

式中: $x_{i,j}$ ——行政区*i*第*j*项污染物排放指标的标准化值;

$X_{i,j}$ ——行政区*i*第*j*项污染物排放指标值;

$X_{\max,j}$ ——第*j*项污染物指标的最大值;

$X_{\min,j}$ ——第*j*项污染物指标的最小值;

R_{ij} ——行政区 i 第 j 项污染物排放指标占比;
 m ——行政区总数;
 n ——污染物指标总数;
 G_j ——变异系数;
 w_j ——第 j 项污染物排放指标在环境污染综合评价指数中的权重;
 EPI_i ——行政区 i 的环境污染综合评价指数。

2 结果与分析

2.1 行业特征

2.1.1 行业分布状况

根据 2018 年深圳市环境统计数据,深圳市涉水污染物排放的工业企业共 1 104 家,行业覆盖生物质能发电、电子电路制造、金属表面处理及热处理加工、牲畜屠宰、棉印染精加工、计算机零部件制造等共 173 个,深圳市各区行业数量分布如图 1 所示。

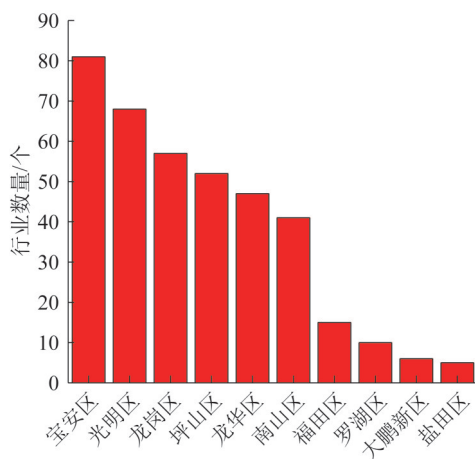


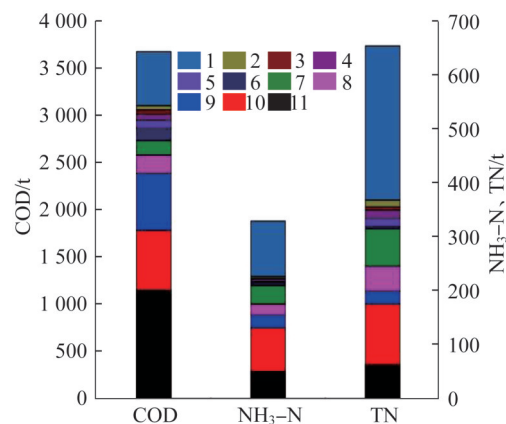
图1 深圳市各行政区行业数量

Fig. 1 Number of industries in each administrative district of Shenzhen

由图1可知,行业数量排名前4的区域分别为宝安区、光明区、龙岗区、坪山区,行业数量分别为81、68、57、52个。根据深圳市各区产业分布^[17]可知,宝安区产业结构以战略性新兴产业为先导、电子信息产业为龙头、装备制造业和传统优势产业为支撑;光明区构建了以智能产业、新材料产业、生命科学产业为主导,以特色服务产业为支撑的“3+1”产业体系;龙岗区聚集了信息通信技术、人工智能物联网、新能源、生命科学、电子元器件等产业集群;坪山区形成了生物、新能源(汽车)、新一代信息技术及智能制造等三大主导产业集群。

2.1.2 污染物主要排放行业

按照《国民经济行业分类》(GB/T 4754—2017)将环境统计数据中的企业按照行业归类,根据各企业 2018 年的 COD、NH₃-N、TN 3 个常规污染物排放量,统计各行业常规水污染物排放量。深圳市工业行业 2018 年 COD、NH₃-N、TN 排放总量贡献如图 2 所示。



1—其他行业;2—其他未列明制造业;3—计算机零部件制造;4—化纤织物染整精加工;5—棉印染精加工;6—其他电子器件制造;7—牲畜屠宰;8—金属表面处理及热处理加工;9—其他智能消费设备制造;10—电子电路制造;11—生物质能发电。

图2 深圳市工业行业常规水污染物排放贡献

Fig. 2 Contribution of Shenzhen's industrial sector to water pollutant discharge

由图2可知,生物质能发电、电子电路制造、其他智能消费设备制造、金属表面处理及热处理加工、牲畜屠宰等行业是水污染物的主要排放源。生物质能发电行业对COD的贡献占比达31.4%,主要来源是垃圾发电厂,可能原因是生物质在生产和储运过程中有部分排放到环境中,导致水污染,如垃圾渗滤液等。其次是电子电路制造行业、其他智能消费设备制造行业,行业排放占比分别为17.2%、16.4%,主要来源包括各种电镀废水、清洗废水等。电子电路制造行业对NH₃-N排放总量的贡献占比达24.5%,这是由于电子电路制造行业刻蚀、电蚀生产工艺会用到氨氮刻蚀液,从而产生氨氮废水。其次为生物质液体燃料生产行业、生物质能发电行业,对排放总量的贡献分别为15.6%、15.3%,主要来源为垃圾收运、处理及发电产生的NH₃-N。TN在各行业间分布较为平均,排放量排名前三的行业分别为电子电路制造、牲畜屠宰、生物质能发电,排放量分别占深圳市TN总排放量的17.2%、10.5%、9.6%。除TN排放

排名前十的行业外,其余行业TN排放总量占深圳市TN总排放量的28.3%。此外,由图2可以看出,各工业行业TN排放量远大于 $\text{NH}_3\text{-N}$ 排放量,是由于深圳市对 $\text{NH}_3\text{-N}$ 的处理主要采用生物法, $\text{NH}_3\text{-N}$ 经硝化反应后以硝氮、亚硝氮等形式存在,且在2018年深圳市暂未对工业废水排放的TN进行考核,因此未

进一步进行反硝化反应,故TN含量高。

根据各企业2018年的石油类、挥发酚、氰化物、总铬四个非常规污染物排放量,统计各行业非常规水污染物排放量。深圳市工业行业2018年石油类、挥发酚、氰化物、总铬排放总量贡献如图3所示。

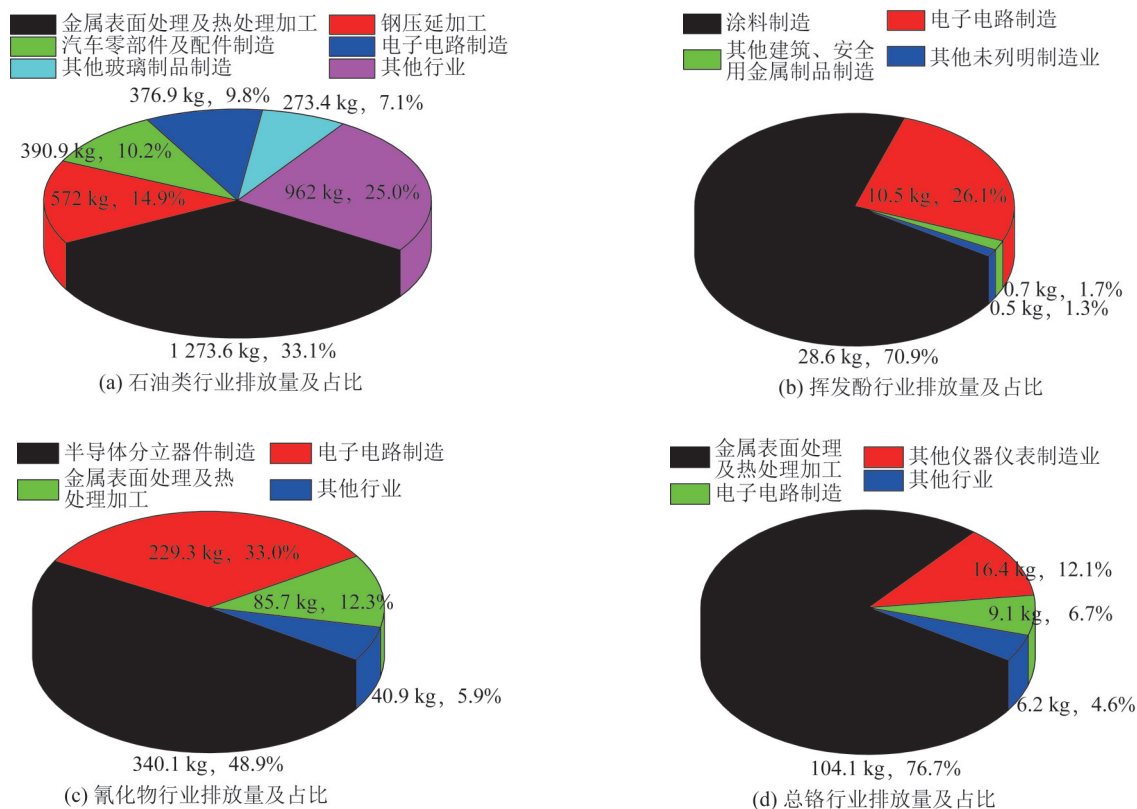


图3 深圳市工业行业非常规水污染物排放贡献

Fig. 3 Contribution of unconventional water pollutant discharge in Shenzhen's industrial sector

由图3可知,石油类污染物排放量最大的行业为金属表面处理及热处理加工行业,这是由于该行业前处理废水包括镀前准备过程中的除油、脱脂等工序产生的清洗废水,其主要污染物为高浓度有机物、悬浮物、石油类以及表面活性剂等。挥发酚仅4个行业有排放,分别为涂料制造、电子电路制造、其他建筑和安全用金属制品制造以及其他未列明制造业,其中涂料制造行业挥发酚排放量最大,占到所有行业排放量的70%,主要是由于溶剂型涂料生产中使用酚醛树脂所致。氰化物行业排放量最大的为半导体分立器件制造和电子电路制造行业,其次为金属表面处理及热处理加工行业,主要是由于这些行业有氰化预镀铜、碱

性氰化物镀金等氰化电镀工序,会产生较多含氰废水。废水总铬排放量最大的行业为金属表面处理及热处理加工行业,占有行业排放量的76.7%,这也是由金属表面处理及热处理加工行业的生产工艺特点所决定的,镀铬、镀黑铬、铬钝化、退镀以及塑料电镀前处理粗化、铬酸阳极化、电抛光等工序均会产生含铬废水,因此排放的含铬废水较多。从图3也可看出金属表面处理及热处理加工行业、电子电路制造等第二产业在深圳市的产业结构中占有重要地位。

2.2 空间分布特征

2.2.1 企业空间分布

根据深圳市2018年环境统计数据提供的各企

业经纬度信息,绘制深圳市各区企业空间分布,深圳市水污染物排放企业空间分布情况如图4所示。

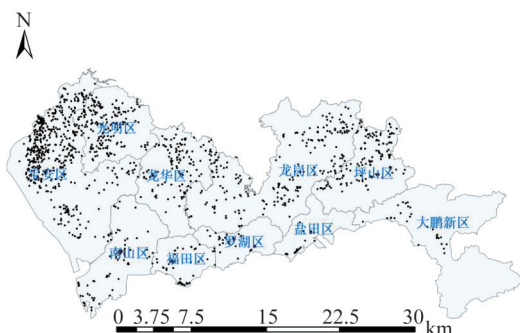


图4 深圳市水污染物排放企业空间分布

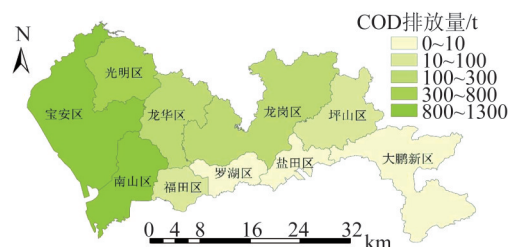
Fig. 4 Spatial distribution of water pollutant discharge enterprises in Shenzhen

在空间分布上,工业企业主要集中在深圳市西北部、东北部的宝安区、光明区、龙岗区、坪山区。深圳市南部及东部地区,即南山区、福田区、罗湖区、盐田区、大鹏新区工业企业分布较少。根据图4统计,企业数量排名前四的区域分别为宝安区、龙岗区、光明区、坪山区,企业数量分别为485、159、140、106个。这种分布与深圳市的发展历程有关,中央于1979年设立深圳经济特区,深圳分为经济特区内和经济特区外两部分。宝安区、龙岗区、光明区、坪山区、龙华区属于当时的特区外,由于土地宽广、租金便宜、人口众多、劳动力聚集,吸引了众多中小企业在此设厂。随着经济的快速发展,深圳不再有经济特区内外之分,福田、南山、罗湖等区作为深圳市的中心区域,吸引了一批高科技企业在此聚集,由于高昂的租金、人力成本以及政策等因素使得该区域企业数量相对宝安、光明、龙岗、坪山、龙华等区域较少。

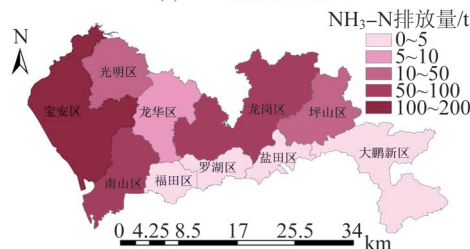
2.2.2 污染物空间分布

将各企业按照所属行政区进行划分,按区统计各类水污染物排放量的空间分布情况,结果如图5所示。

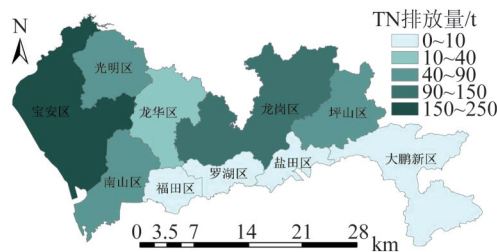
由图5可知,COD排放量排名前4的区分别为南山区、宝安区、光明区、龙岗区,COD排放量分别为1285.28、1114.02、770.50、255.37 t,4个区COD排放量占深圳市COD总排放量的91.5%。宝安区和龙岗区的 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、TN排放量均较大, $\text{NH}_3\text{-N}$ 排放量分别为127.04、84.85 t,占深圳市 $\text{NH}_3\text{-N}$ 总排放量的64%。TN排放量分别为232.89、148.58 t,占深圳市TN总排放量的58%。3种水污染物的空间排放特征与企业的空间分布特征一致,即企业分布越密集的



(a) COD排放空间分布



(b) $\text{NH}_3\text{-N}$ 排放空间分布



(c) TN排放空间分布

图5 深圳市水污染物排放空间分布

Fig. 5 Spatial distribution of water pollutant discharge in Shenzhen 行政区污染物排放量也越大。

2.2.3 空间分布相关性

EPI值是对各行政区COD、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、TN这3种水污染物排放的综合评价结果,EPI值越小,说明污染物综合排放量越大,污染越严重,反之污染越轻,深圳市各行政区EPI值如图6所示。

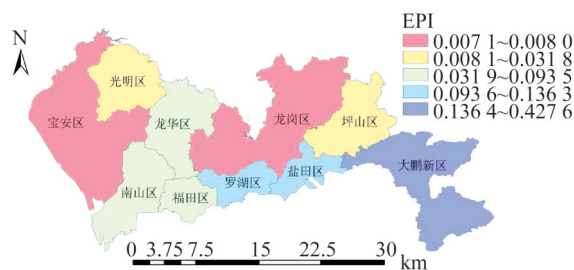


图6 深圳市各行政区EPI值

Fig. 6 EPI value of each administrative district in Shenzhen

由图6可知,EPI值最小的是宝安区和龙岗区,其次为光明区和坪山区,EPI值最大的为大鹏新区。说明宝安、龙岗、光明、坪山区的污染物综合排放量最大,污染最严重,大鹏新区的污染物综合排放量最小,污染

最轻。结合 2.2.2 节污染物的空间分布,可知 3 种水污染物综合评价结果与其空间排放特征基本一致。

2.3 城市污染对比

通过分析第二次全国污染源普查数据,了解城市的产业结构及污染物产生情况,并分析两者之间的关系。以北京、上海、广州、深圳、天津、重庆、武汉、厦门、杭州 9 个国内大城市第二次全国污染源普查数据为例进行对比分析,结果如表 1 所示。

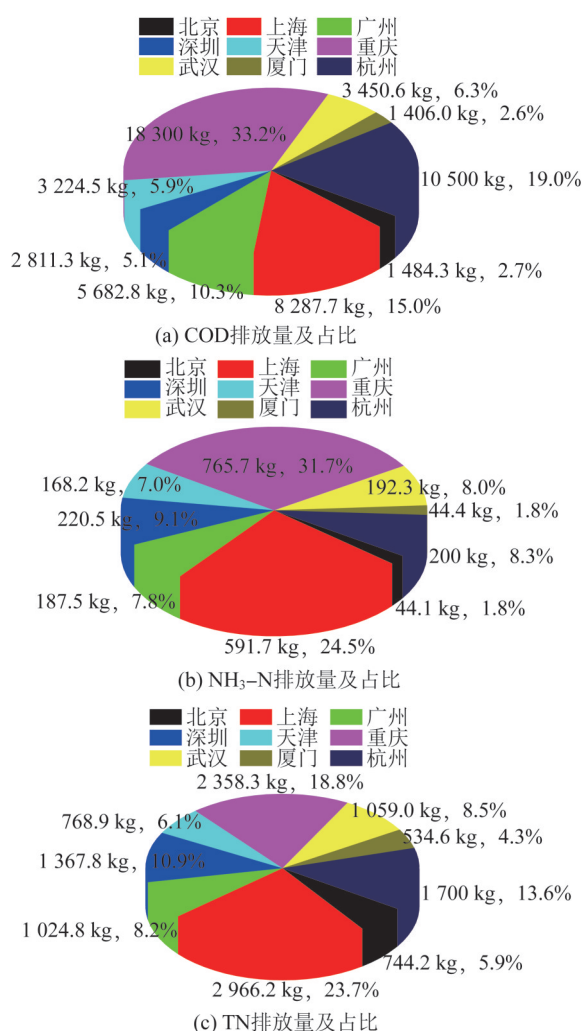
表 1 北京、上海、深圳第二次全国污染源普查数据对比				
Table 1 Data comparison of the second national pollution source census in Beijing, Shanghai and Shenzhen				
城市	工业源普查数量/个	排名前三行业名称及数量		前三行业数量占普查数量比例/%
		名称	数量/个	
北京	9 393	金属制品业	1 044	29
		电力、热力生产和供应业	1 038	
		非金属矿物制品业	632	
上海	36 841	金属制品业	6 272	41
		通用设备制造业	5 545	
		专用设备制造业	3 150	
广州	65 897	—	—	—
		—	—	
		—	—	
深圳	95 364	模具制造	6 855	17
		机械零部件加工	4 914	
		塑料零件及其他塑料制品制造	4 176	
天津	25 740	金属制品业	4 683	37
		通用设备制造业	3 245	
		橡胶和塑料制品业	1 667	
重庆	53 804	农副食品加工业	6 163	33
		非金属矿物制品业	6 043	
		金属制品业	5 675	
武汉	9 230	金属制品业	1 282	37
		非金属矿物制品业	1 241	
		纺织服装、服饰业	884	
厦门	10 443	金属制品业	1 623	36
		橡胶和塑料制品业	1 318	
		专用设备制造业	857	
杭州	35 069	—	—	—
		—	—	
		—	—	

由表 1 可知,国内污染排放较重的行业主要为金属制品业、橡胶和塑料制品业、非金属矿物制品业、专用设备制造业等行业,以第二产业为主。除武汉、北京外,其他城市工业源普查数量均在 1 万个以上。深圳市工业源普查数量最多,达 95 364 个,其次为广州、重庆,工业污染源普查数量分别为 65 897、53 804 个。工业源普查数量越多表明城市中存在的工业企业数量越多。

通过对比不同城市工业源 COD、NH₃-N、TN 的排放量与工业企业数量的关系,分析深圳市在工业水污染控制方面的成效。图 7 为国内 9 个超大型工业城市工业源 COD、NH₃-N、TN 的排放量及占比。

结合表 1 和图 7 数据可知,北京市第二次全国污

染源普查数量仅为深圳市的 1/10,但 COD 和 TN 年排放总量达到深圳市的 1/2,NH₃-N 年排放总量达到深圳市的 1/5;上海市第二次全国污染源普查数量约为深圳市普查数量的 2/5,但 COD 和 NH₃-N 年排放总量达到深圳市 COD 和 NH₃-N 年排放总量的 3 倍,TN 年排放总量达到深圳市 TN 年排放总量的 2 倍多;广州市第二次全国污染源普查数量约为深圳市的 2/3,但 COD 排放总量约为深圳市的 2 倍;天津市第二次全国污染源普查数量约为深圳市的 1/4,但 COD 排放总量约为深圳市的 1.2 倍,COD 排放量远大于深圳,TN 排放量约为深圳市的 1/2;重庆、杭州第二次全国污染源普查数量分别约为深圳市的 1/2

图7 各城市COD、NH₃-N、TN排放量及占比Fig. 7 COD, NH₃-N, TN emissions and proportions of each city

和1/3,但COD排放量分别达到深圳市的6.5倍和3.7倍,重庆市的NH₃-N排放量约为深圳市的3.5倍,杭州市的TN排放量约为深圳市的1.2倍,污染物排放量远远大于深圳市;而武汉、厦门两个城市的工业源普查数量远少于深圳,但COD、NH₃-N、TN的排放量与深圳相差不多,甚至大于深圳。上述分析可知尽管深圳市工业源普查数量位居国内各大城市之首,但COD、NH₃-N、TN排放量相比其他城市来说很少,这得益于深圳市的产业结构和污染控制手段。深圳属于粤港澳大湾区,主导新兴产业与科技创新的服务经济,属于“清洁产业”,污染物的排放量相对较少,能源消耗量少;厦门市、武汉市的产业结构均是以现代服务业为主导、先进制造业为支撑、都市现代农业为基础,污染物排放量较深圳更多;而北京、天津属于京津冀地区,主导能源行业以及尖端制造业经济,上海、杭

州位于长三角,主导高端装备制造业经济,位于成渝经济圈的重庆则主导新型工业化产业经济,这种产业结构使得本身污染产生量较深圳更多。同时由于深圳在工业水污染源整治方面下了大力气进行控制,如源头控制,重视生产原料和生产辅料的选择,减少污染物的产生隐患;对于已经产生的废水,采用分类收集、分别处理、加强废水的循环利用;加强对工业废水的监管,实行全覆盖监管,充分利用在线监控等科技手段,开展非现场执法检查和治污设施的实时监管。这一系列污染控制措施加上深圳市的产业结构类型使得深圳市的工业源污染物控制效果相比国内其他超大型工业城市的污染控制效果更好。

3 结论

(1)深圳市COD、NH₃-N排放量最大的行业分别为生物质能发电、电子电路制造,排放量分别占总排放量的31.4%、24.5%,TN排放各行业间分布较为平均。金属表面处理及热处理加工行业的石油类和废水总铬污染物排放量最大,涂料行业的挥发酚排放量最大,半导体分立器件制造的氰化物排放量最大。

(2)南山区、宝安区、光明区、龙岗区COD排放总量占总排放量的91.5%。宝安区和龙岗区NH₃-N、TN排放总量均较大,两区NH₃-N排放总量占深圳市总排放量的64%、TN排放总量占58%。3种水污染物的空间排放特征与其综合评价结果、企业的空间分布特征基本一致。

(3)与国内8个大型城市相比,深圳市的工业源普查数量最多,但污染物排放量相对较少,深圳市在工业源污染物排放控制方面成效较好,处于国内领先水平。

4 对策及建议

(1)目前深圳市工业企业NH₃-N排放已基本达标,但由于受场地所限,大部分工业企业无法使用传统反硝化技术,出水TN含量很高,排放至自然水体中会对环境造成危害。建议研发一种占地面积小、运行成本低、运行稳定的脱氮技术,从根本上去除氮。

(2)深圳市的产业结构以制造业、电力、燃料等第二产业为主,对比东京、纽约等以教育、医疗、旅游等第三产业为主的全球经济发达城市^[18-19],污染情况较为严重。建议借鉴东京、纽约、伦敦等城市,积极发展第三产业,同时发展以高新技术推进的高端、先进制造业,最终实现以服务业为主,制造业和服务

业共同发展的产业格局。

参考文献

- [1] 丁淳怡. 某工业废水处理厂综合废水优化处理的研究:以某工业园区工业废水处理厂为例[D]. 苏州:苏州科技大学, 2019.
DING Chunyi. Study on integrated wastewater optimization in an industrial wastewater treatment plant: A case study of an industrial park industrial wastewater treatment plant[D]. Suzhou: Suzhou University of Science and Technology, 2019.
- [2] 庄汝龙, 宓科娜, 梁龙武. 中国工业废水排放格局及其驱动因素[J]. 长江流域资源与环境, 2018, 27(8): 1765-1775.
ZHUANG Rulong, MI Kena, LIANG Longwu. China's industrial wastewater discharge pattern and its driving factors[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2018, 27(8): 1765-1775.
- [3] 张越群. 我国工业废水处理现状及趋势[J]. 水工业市场, 2011(6): 23-26.
ZHANG Yuequn. status and trends of industrial wastewater treatment in my country[J]. Water-Industry Market, 2011(6): 23-26.
- [4] 冉治霖, 姚萌, 董晓清, 等. 难降解工业废水生物强化脱氮机制研究进展[J]. 深圳信息职业技术学院学报, 2018, 16(5): 79-84.
RAN Zhilin, YAO Meng, DONG Xiaoqing, et al. Research progress on mechanism of biological enhanced denitrification of refractory industrial wastewater[J]. Journal of Shenzhen Institute of Information Technology, 2018, 16(5): 79-84.
- [5] 张莹. 重污染城市河流水污染特征分析及补水方案研究[D]. 重庆:重庆大学, 2019.
ZHANG Ying. The study on the analysis of water pollution characteristics and water replenishment schemes in heavily polluted urban watershed[D]. Chongqing: Chongqing University, 2019.
- [6] 张健. 深圳市水污染治理策略研究[D]. 长春:吉林建筑大学, 2020.
ZHANG Jian. Research on water pollution control strategy in Shenzhen[D]. Changchun: Jilin Jianzhu University, 2020.
- [7] 李科. 技术创新、产业结构升级对环境污染的影响[D]. 武汉:华中科技大学, 2013.
LI Ke. The impact of technological innovation and industrial structure upgrading on environmental pollution[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2013.
- [8] 王青, 赵景兰, 包艳龙. 产业结构与环境污染关系的实证分析:基于1995—2009年的数据[J]. 南京社会科学, 2012(3): 14-19.
WANG Qing, ZHAO Jinglan, BAO Yanlong. The Empirical analysis of the relationship between industrial structure and environmental pollution: Based on the data for the year 1995-2009[J]. Social Sciences in Nanjing, 2012(3): 14-19.
- [9] GROSSMAN G M, KRUEGER A B. Economic growth and the environment[J]. The Quarterly Journal of Economics, 1995, 110(2): 353-377.
- [10] 李斌, 赵新华. 经济结构、技术进步与环境污染:基于中国工业行业数据的分析[J]. 财经研究, 2011, 37(4): 112-122.
LI Bin, ZHAO Xinhua. Economic structure, technological progress and environmental pollution: Based on the analysis of industrial data in China[J]. Journal of Finance and Economics, 2011, 37(4): 112-122.
- [11] LINDMARK M. An EKC-pattern in historical perspective: Carbon dioxide emissions, technology, fuel prices and growth in Sweden 1870-1997[J]. Ecological Economics, 2002, 42(1/2): 333-347.
- [12] PASCHE M. Technical progress, structural change, and the environmental Kuznets curve[J]. Ecological Economics, 2002, 42(3): 381-389.
- [13] 王菲, 董锁成, 毛琦梁. 中国工业结构演变及其环境效应时空分异[J]. 地理研究, 2014, 33(10): 1793-1806.
WANG Fei, DONG Suocheng, MAO Qiliang. Evolution of China's industrial structure and spatial-temporal differentiation in environmental effect[J]. Geographical Research, 2014, 33(10): 1793-1806.
- [14] 李华林, 张建军, 张耀方, 等. 基于不同赋权方法的北运河上游潜在非点源污染风险时空变化特征分析[J]. 环境科学, 2021, 42(6): 2796-2809.
LI Hualin, ZHANG Jianjun, ZHANG Yaofang, et al. Analysis of spatial-temporal variation characteristics of potential non-point source pollution risks in the upper Beiyun River Basin using different weighting methods[J]. Environmental Science, 2021, 42(6): 2796-2809.
- [15] 李雪迎, 杨曦, 乔琦, 等. 黄河流域甘肃段工业行业水污染物空间排放特征[J]. 环境科学, 2022, 43(5): 2459-2466.
LI Xueying, YANG Xi, QIAO Qi, et al. Emission characteristics of industrial water pollutants in Gansu section of the Yellow River Basin[J]. Environmental Science, 2022, 43(5): 2459-2466.
- [16] 杨杰, 叶小榕. FDI与污染排放:基于工业废气与环境污染综合评价指数的对比分析[J]. 广西财经学院学报, 2016, 29(2): 16-23.
YANG Jie, YE Xiaorong. FDI and polluting emission: Comparative analysis based on industrial waste gas and EPI[J]. Journal of Guangxi University of Finance and Economics, 2016, 29(2): 16-23.
- [17] 章文, 吴洪, 乔纪纲. 深圳产业演进规律及空间分布格局[J]. 地域研究与开发, 2014, 33(5): 34-38.
ZHANG Wen, WU Hong, QIAO Jigang. Evolutionary law and spatial pattern of Shenzhen industries[J]. Areal Research and Development, 2014, 33(5): 34-38.
- [18] 朱尔茜. 产业结构调整与都市经济圈发展:基于美、日、中三国的比较分析[J]. 湘潭大学学报:哲学社会科学版, 2013, 37(2): 65-68.
ZHU Erqian. On the adjustment of industrial structure and development of metropolitan economic circles: A comparative analysis based on the US, Japan and China[J]. Journal of Xiangtan University: Philosophy and Social Sciences, 2013, 37(2): 65-68.
- [19] 张晓兰. 东京和纽约都市圈经济发展的比较研究[D]. 长春:吉林大学, 2013.
ZHANG Xiaolan. Comparative study of economic development on Tokyo and New York metropolis circle[D]. Changchun: Jilin University, 2013.

[作者简介] 孙敬锋(1965—), 本科。电话: 0755-23882966, E-mail: sunjf@meeb.sz.gov.cn。通讯作者: 赵鑫, 博士, 高级工程师。电话: 0755-82349632, E-mail: zhaoxin@mail.bnu.edu.cn。

[收稿日期] 2022-11-06(修改稿)