

DOI: 10.5846/stxb201512092463

陈向, 周伟奇, 韩立建, 虞文娟. 京津冀地区污染物排放与城市化过程的耦合关系. 生态学报, 2016, 36(23): 7814-7825.

Chen X, Zhou W Q, Han L J, Yu W J. Spatiotemporal variations of pollutant emissions and their relationship with the urbanization of the Beijing-Tianjin-Hebei agglomeration. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(23): 7814-7825.

京津冀地区污染物排放与城市化过程的耦合关系

陈 向^{1,2}, 周伟奇^{1,2,*}, 韩立建¹, 虞文娟^{1,2}

1 中国科学院生态环境研究中心, 城市与区域生态国家重点实验室, 北京 100085

2 中国科学院大学, 北京 100049

摘要:我国快速的城市化发展不仅带来了经济的迅速发展和人口的大量聚集,同时也对资源 and 环境产生了巨大的影响。在城市化进程较为快速的城市群地区,城市化带来的生态环境胁迫尤为突出。以典型污染物为指标,定量研究了京津冀地区 13 个城市在 2000 年、2005 年、2010 年的工业和生活污染物的排放总量、人均排放量、排放效率、排放强度的时空特征,研究了经济发展与污染物排放的定量响应模式,以探讨污染物排放与城市化的耦合关系。研究发现:(1)京津冀地区的污染物排放空间分异特征显著,其中北京的生活污水、生活 COD 等污染物排放总量为地区内最高,唐山、天津、石家庄等城市的工业污染物排放高于其它城市。(2)北京、天津工业污染物的排放效率较高,人均排放量、排放强度低于其它城市。(3)2000—2010 年间,京津冀地区的生活污水、工业废气、工业固废排放显著增加($P>0.05$),而其它生活和工业污染物排放量、排放效率和排放强度等呈显著下降趋势($P>0.05$)。(4)京津冀地区的工业废水、工业和生活 SO_2 、生活烟尘、工业固废和工业废气等污染物的排放量与经济发展存在环境库兹涅兹曲线特征($R^2<0.5, P<0.05$)。定量揭示了京津冀地区污染物排放的时空分布特征及其与城市化发展的关系,可为城市群区域污染物排放的管理及环境保护政策的制定提供科学参考。

关键词:京津冀地区;污染物排放量;环境库兹涅兹曲线

Spatiotemporal variations of pollutant emissions and their relationship with the urbanization of the Beijing-Tianjin-Hebei agglomeration

CHEN Xiang^{1,2}, ZHOU Weiqi^{1,2,*}, HAN Lijian¹, YU Wenjuan^{1,2}

1 State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China

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

Abstract: Rapid urbanization in China has led to tremendous socio-economic development, but has also caused a variety of environmental problems. The Beijing-Tianjin-Hebei (BTH) agglomeration is one of the most rapidly urbanizing areas in China, and is currently facing with considerable resource depletion challenges and severe local and regional pollution. In order to understand the impact of urbanization on regional environments, we investigated the spatiotemporal characteristic of the emissions of 10 types of pollutants in the 13 cities in the BTH region, from 2000 to 2010. The pollutants included: domestic sewage (DS), industrial waste water (IWW), industrial and domestic chemical oxygen demand (ICOD; DCOD), industrial and domestic sulfur dioxide (ISO_2 ; DSO_2), industrial and domestic smoke and dust (ISD; DSD), industrial solid waste (ISW), and industrial waste gas (IWG). Pollutant emissions per capita (PEPC), pollutant emissions per unit of GDP (PEPUG), and pollutant emissions per unit of area (PEPUA) were calculated for 2000, 2005, and 2010. We further examined the relationship between the emissions and economic development to investigate whether

基金项目:国家自然科学基金青年科学基金资助项目(41301199);国家自然科学基金重大资助项目(41590840)

收稿日期:2015-12-09; **修订日期:**2016-05-09

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: wzhou@rcees.ac.cn

pollutant emissions in the region fit an environmental Kuznets curve (EKC). The results showed that: (1) There was considerable variation in the pollutant emissions among the cities. Four cities (Beijing, Tianjin, Tangshan, and Shijiazhuang) accounted for 37% to 69% of the total pollutant emissions in the region. Higher average DS and DCOD emissions were noted for Beijing (942.37 million t and 116214 t, respectively) than for the other cities. In contrast, the IWW, ICOD, ISO_2 , ISD, ISW, and IWG emissions were higher in Tianjin, Tangshan, and Shijiazhuang than in the other cities; (2) Compared to the other cities, the highest domestic and industrial pollutant emissions were noted in Beijing and Tianjin, respectively. However, the PEPC, PEPUG, and PEPUA were lower in these two cities than in the other cities, except for the DS pollutant. In fact, the PEPC, PEPUG, and PEPUA for DS were much higher in Beijing than in the other cities. For example, the PEPUG for DS in Beijing was 21295 kg/10000 Yuan, while the regional average was 11914 kg/10000 Yuan; (3) From 2000 to 2010, changes in pollutant emissions varied among the cities. The total PEPC and PEPUA for the DS, ISW, and IWG emissions increased for most of the cities. For example, IWG emissions in Tangshan increased from 266.6 billion Nm^3 in 2000 to 1687 billion Nm^3 in 2010. However, IWW, ICOD, DCOD, ISO_2 , DSO_2 , ISD, and DSD emissions, decreased from 2000 to 2010; and (4) There were EKC characteristics for the IWW, ISW, IWG, DSO_2 , and DSD pollutants in the region ($R^2 < 0.5$, $P < 0.05$). The turning point for pollutant emissions typically occurred when the per capita GDP reached approximately 40000 Yuan. Overall, the considerable variations in total emissions and emission intensity among cities in the region suggested that differentiated policies and actions should be taken to either reduce the total emissions of certain types of pollutants, or increase the efficiency of resource utilities. For example, Beijing should focus more on the reduction of DS emissions, whereas Tangshan, Tianjin, Shijiazhuang, and other industrial cities should focus on controlling the emissions of industrial pollutants. The results further revealed the relationship between pollutant emissions and the degree of urban development, which enhances our understanding of the effect of urbanization on local and regional environments.

Key Words: Beijing-Tianjin-Hebei region; pollutant emissions; environmental Kuznets curve (EKC)

改革开放以来,我国社会经济与城市化发展迅速。尤其是 2000 年以来,经济快速增长,到 2010 年,经济总量已位列世界第二。我国的人口城市化率从 1978 年的 17.9% 增长到 2014 年的 54.77%,预计到 2020 年将达到 60%^[1]。经济的快速发展和人口的大规模快速集聚,对资源与环境产生了巨大的影响,如水资源短缺和水污染^[2]、大气污染^[3]、土壤污染^[4]及城市热岛^[5-6]等一系列的问题。这些问题在我国经济高速发展的城市和城市群地区中尤为突出。

“十一五”规划及《国家新型城镇化规划(2014—2020 年)》均指出,我国将以城市群为主体形态,推进我国的新型城市化发展。在国家战略的推动下,城市群的发展无疑将对我国经济社会的发展发挥更加重要的作用,而同时,也可能因此产生更为复杂的城市与区域生态环境问题^[1,7]。因此,急需开展以城市群为对象,研究城市群发展对生态环境的影响。

目前,城市群尺度上开展的生态环境问题研究,主要针对地区整体性影响^[8-10],而对城市群内部环境的时空异质性关注较少^[11]。已有的一些研究显示,城市群内部生态环境质量具有明显的空间差异。如长三角地区的生态环境质量在空间上呈现以上海—苏锡常—南京为界,南面最好,北面次之,中间最差的格局^[12]。在京津冀地区,城市污染物排放空间差异明显。研究表明,北京市的生活污染物已经成为京津冀地区水污染的主要来源,而工业污染物则主要来源于天津及河北省各城市^[13]。但是总体而言,对城市群生态环境质量、污染物排放的空间特征,及其演变的研究尚显不足。而在城市群尺度,对如何协调快速的经济增长与环境污染之间的关系的研究相对较少。众多的学者主要在城市尺度,基于环境库兹涅茨曲线(Environment Kuznets Curve, EKC),研究了经济发展与环境污染之间的关系^[14]。发现当人均 GDP 处于较低阶段时,经济增长导致环境恶化,而当人均 GDP 达到某拐点后经济增长对环境污染的改善则有积极作用^[15-20]。

鉴于城市群尺度研究的重要性和研究不足的现状,本文选取我国城市化发展迅速、生态环境问题突出的京津冀城市群为研究对象,进行定量研究:1)城市群内部污染物排放的时空分异特征,及 2) 污染物排放与城市化指标之间的关系,进而探讨 3) 京津冀城市群经济发展与各污染物之间是否存在 EKC 特征,4) 以确定京津冀地区主要污染物的排放规律,为该地区的生态环境保护及政策的实施提供科学依据。

1 数据与方法

1.1 研究区域

京津冀城市群位于华北地区与东北地区间的结合部,是我国华北平原核心区域,包含北京、天津两个直辖市和河北省的 11 个地级市(图 1),总面积为 21.58 万 km²,占全国总面积的 2.3%。该区域是我国继长江三角洲和珠江三角洲之后又一经济快速发展的地区,到 2010 年,地区生产总值(GDP)达 43954 亿元。区域内人口稠密,人口密度达 442 人/km²。京津冀城市群城市化发展迅速,1980—2010 年,人口城市化率从 22%增长至 41.3%。然而,区域内的人口城市化率差异明显。2010 年,北京和天津均超过 60%。尤其是北京,其人口城市化率高达 79.36%,远高于地区 41.3%的平均水平。2000—2010 年,京津冀地区积极实施可持续发展战略,生态环境急剧恶化的趋势有所减缓。但与国家环境空气质量标准相比仍有一定的差距,PM_{2.5}浓度超标及河湖水质不达标等逐渐成为突出的环境问题^[2,21]。

1.2 数据及来源

人口、经济及城市面积数据主要来源于统计年鉴(表 1)。污染物排放数据主要来源于《中国城市统计年鉴》及《全国生态环境十年变化(2000—2010 年)遥感调查与评估项目》及地区环境状况公报等。

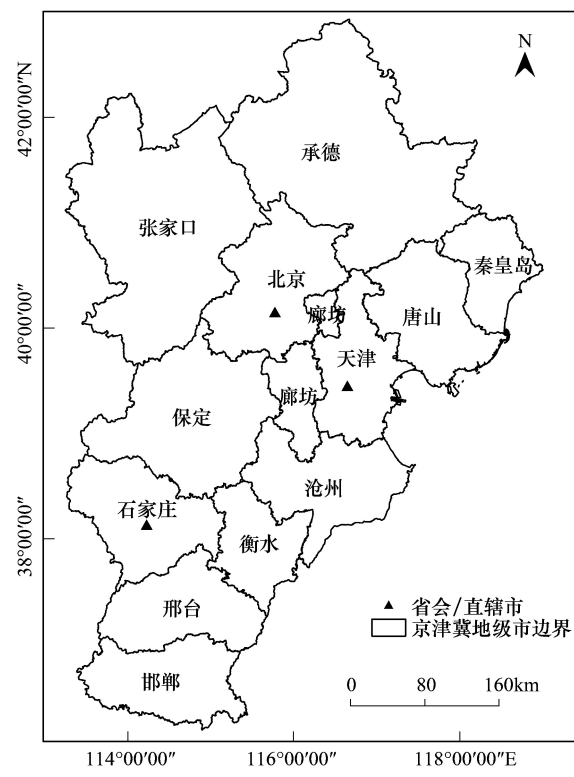


图 1 京津冀地区内城市行政边界

Fig.1 The administrative boundaries of the cities in Beijing-Tianjin-Hebei agglomeration

表 1 本文所用数据及来源

Table 1 Types and resources of the data used to analysis

城市 Cities	人口/万人 Populations/ten thousand			GDP/亿元 GDP/hundred million			市区面积/km ² Administrative area			数据来源 Data resources
	2000	2005	2010	2000	2005	2010	2000	2005	2010	
北京	1107.53	1180.7	1257.8	2478.76	4387.00	7527.20	16808	16410	16411	《中国统计年鉴》 《北京统计年鉴》 《天津统计年鉴》 《河北经济年鉴》 《中国城市统计年鉴》
天津	912	939.31	984.85	1639.36	3155.22	6660.33	11920	11920	11760	
石家庄	889.8	927.3	989.16	1003.11	1755.38	3120.66	15848	15848	15848	
唐山	699.79	714.51	735	915.05	1663.60	3121.41	13472	13472	13472	
秦皇岛	266.29	278.64	288.3	285.39	484.54	852.11	7812	7523	7523	
邯郸	838.48	871.43	963.5	542.36	970.72	1787.55	12062	12062	12062	
邢台	658.94	675.08	732.03	370.38	641.42	1112.93	12486	12486	12486	
保定	1055.17	1092.17	1161.01	702.22	1251.27	2177.04	22092	20584	20584	
张家口	449.79	450.29	465.97	243.93	400.04	718.00	36862	36873	36873	
承德	353.87	361.28	372.96	163.03	305.11	586.07	39513	39548	39548	
沧州	668.97	684.75	730.89	461.35	835.70	1577.02	14201	14053	14053	
廊坊	378.76	391.57	419.02	368.82	654.01	1207.45	6429	6429	6429	
衡水	411.47	417.63	440.2	298.56	528.11	799.66	8815	8815	8815	

1.3 研究方法

本文以工业废水、生活污水、工业和生活 SO_2 、工业和生活 COD、工业和生活烟粉尘、工业固废和工业废气等污染物排放为研究指标,以城市群内 13 个城市为研究对象,定量分析 2000 年、2005 年和 2010 年污染物排放总量的时空特征及污染物排放总量与城市化的关系。城市化过程主要包括城市人口的增长、经济发展、城市空间扩张等方面^[22]。因此,本文用污染物人均排放量、单位 GDP 污染物排放量及单位国土面积污染物排放量等指标研究污染物排放与城市化程度的关系(表 2)。

为了探究京津冀城市群是否存在“环境库兹涅茨曲线(EKC)”现象,即人均 GDP 的增长和污染物排放之间是否存在倒“U”型曲线的关系,以及这种倒“U”型曲线关系在各种污染物之间是否有差别,本文对各污染物排放与人均 GDP 的关系进行了研究。本文中的人口数据为统计年鉴中用到的常住人口。GDP 是以 2000 年为基准价进行环比指数连乘法计算后得到的不变价 GDP^[23]。

表 2 京津冀地区污染物排放与城市化关系分析内容、指标、方法及意义

Table 2 Indexes selected to analyze the relationships of urbanization and the pollutants emissions in this study

分析内容 Contents	分析指标 Index	分析方法 Method	指标意义 Implication
工业废水和生活污水(万 t)、工业和生活 COD(t)、工业和生活 SO_2 (t)、工业和生活烟粉尘(t)、工业废气(万标 m^3)、工业固废(万 t)	污染物排放总量	污染物排放总量	污染物排放特征
	污染物人均排放量	污染物排放量/常住人口	污染物排放与人口的关系
	污染物排放效率	污染物排放量/不变价 GDP	污染物排放与经济的关系
	污染物排放强度	污染物排放量/市区面积	污染物排放与土地面积的关系

2 结果

2.1 京津冀城市群污染物排放总量的时空特征

京津冀城市群污染物排放总量时空差异明显(图 2)。其中,经济发展和人口规模较大的北京、天津、唐山、石家庄,其污染物排放总量高于其它城市。2000—2010 年,各城市生活污水、工业废气及工业固废等污染物排放总量仍呈现上升趋势,但其它污染物排放总量呈下降趋势。具体表现为:

时间上,2000—2010 年,总体而言,地区生活污染物排放量和工业污染物排放量呈下降趋势,尤其在 2005—2010 年间,工业污染物排放量下降明显。但是个别类似的工业污染物,如工业废气和工业固废,其排放总量在多数城市中有明显上升的趋势。尤其是唐山市,其工业废气排放量从 2000 年的 26.66×10^6 万标 m^3 上升至 2010 年的 16.87×10^7 万标 m^3 ,增长了 5.3 倍。不同于其他类型的生活污染物,生活污水排放量在多数城市呈现上升趋势。如北京市,2000 年,生活污水排放量为 66300 万 t,2010 年增长到 128217 万 t,约占京津冀地区 2010 年污水排放量的 40%。

空间上,北京、天津、唐山、石家庄 4 个城市的污染物排放量大、约占京津冀地区污染物排放量的 37%—69%。其中,北京的生活污水及生活 COD 排放量远高于其它城市,平均分别达到 94237 万 t 和 116215t。而以工业发展为主的唐山、石家庄等城市,工业污染物排放量则高于生活污染物排放量。

2.2 京津冀城市群污染物排放与城市化的耦合关系

本部分分析了污染物排放与人口、GDP 及单位国土面积等城市化指标之间的关系。

2.2.1 污染物人均排放量的时空特征

京津冀地区的污染物人均排放量时空差异明显(图 3)。总体而言,在北京、天津等人口密度高的城市,污染物人均排放量低于河北其它城市;除生活污水、工业废气和工业固废外,其它类型污染物人均排放量在各个城市均呈下降趋势。具体表现为:

时间上,人均生活污水排放量逐年增加。其它污染物,如 COD、 SO_2 、烟粉尘等,人均排放量在多数城市中呈下降趋势。其中石家庄的人均工业烟粉尘排放量下降最快,从 2000 年的 31.1 kg/人下降到 2010 年的

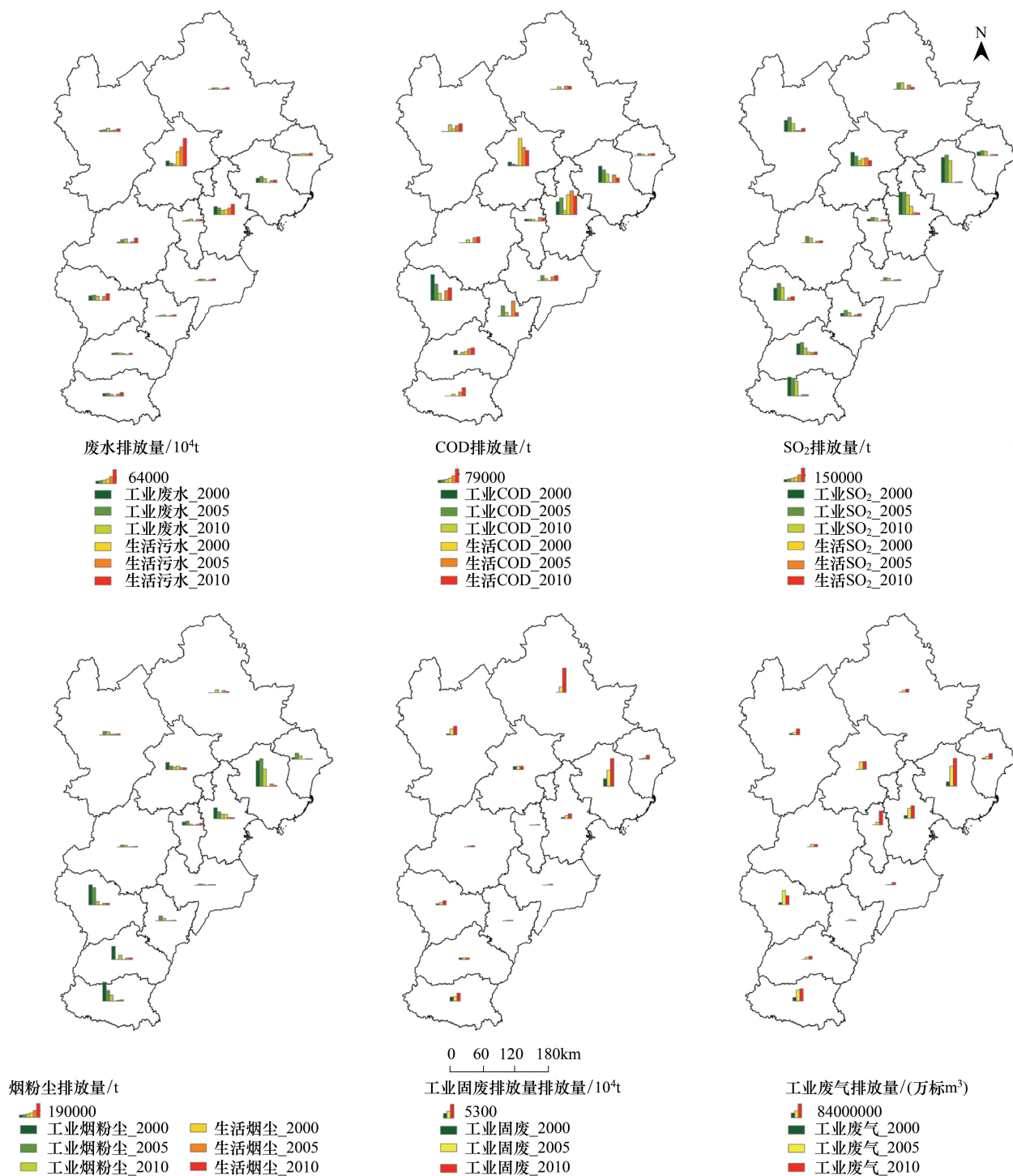


图2 污染物在京津冀地区各城市中的排放空间差异及时间变化特征

Fig.2 Spatial and temporal variation of total amount of pollutants emissions in Beijing-Tianjin-Hebei agglomeration

4.7 kg/人,减少了近 85%。受排放总量增加的影响,京津冀地区的人均工业废气及人均工业固废排放量均呈上升趋势,其中廊坊的人均工业废气排放量增加最为明显,从 2000 年的 0.25 万标 m³/人增长到 2010 年的 20 万标 m³/人。

空间上,以工业发展为主的唐山、石家庄等城市,人均工业污染物排放量较大。由于天津市人口较多,虽然排放总量大,但部分人均工业污染物排放量低于石家庄、邯郸、张家口等城市。北京市不仅生活污水排放总

量大,其人均生活污水排放量也远高于其它城市。2010 年,北京市人均生活污水排放量达到 101938 kg/人,远高于京津冀地区 29011 kg/人的平均人均排放水平。

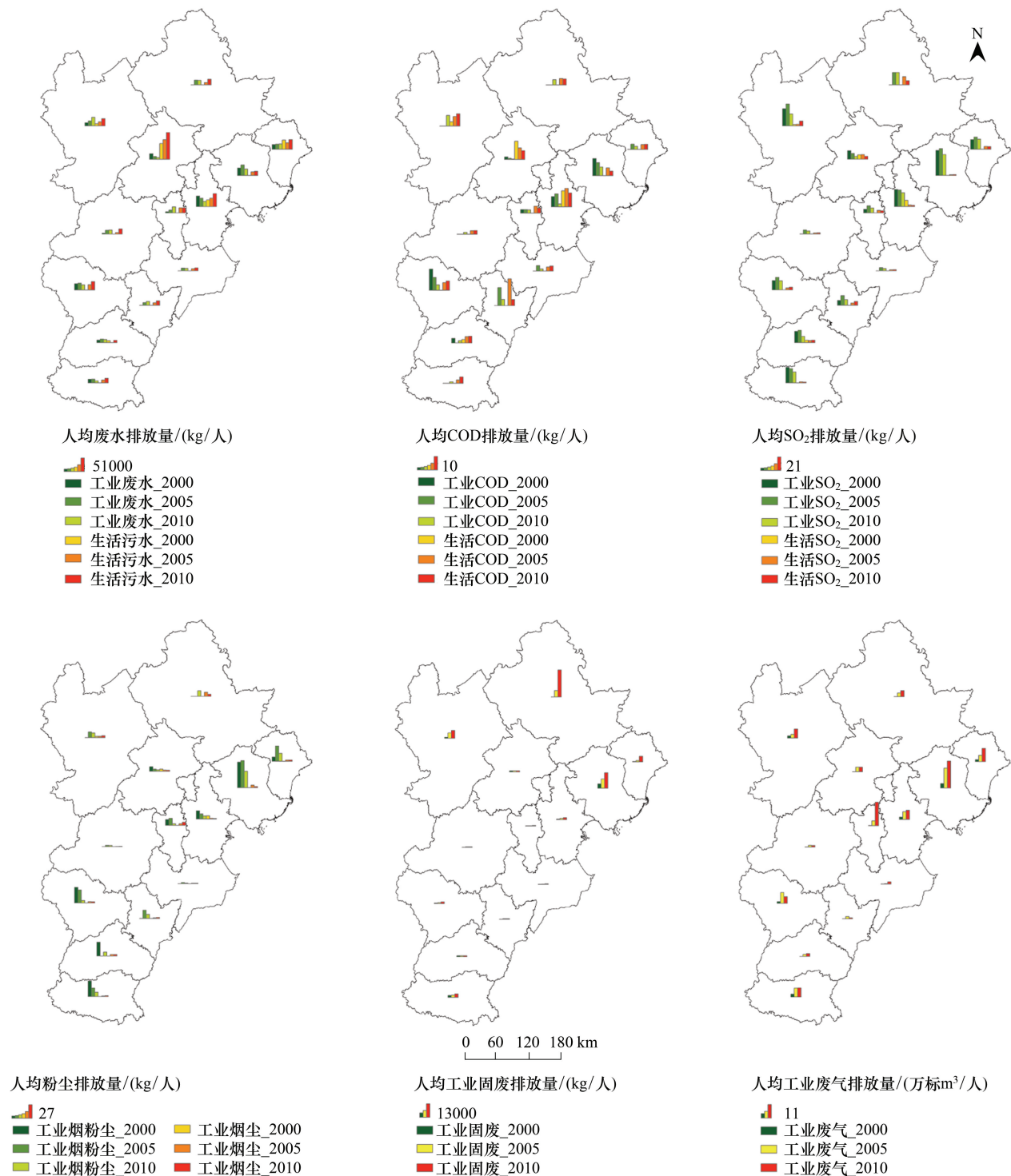


图3 京津冀地区人均污染物排放空间差异及时间变化特征

Fig.3 Spatial and temporal variation of pollutants emissions per capita in Beijing-Tianjin-Hebei agglomeration

2.2.2 污染物排放效率时空特征

京津冀地区的污染物排放效率时空差异明显(图4)。2000—2010年,随着经济的快速发展,多数城市的单位GDP污染物排放量在下降,排放效率逐步提高。在经济规模较大、发展较好的地区,如北京、天津等,污

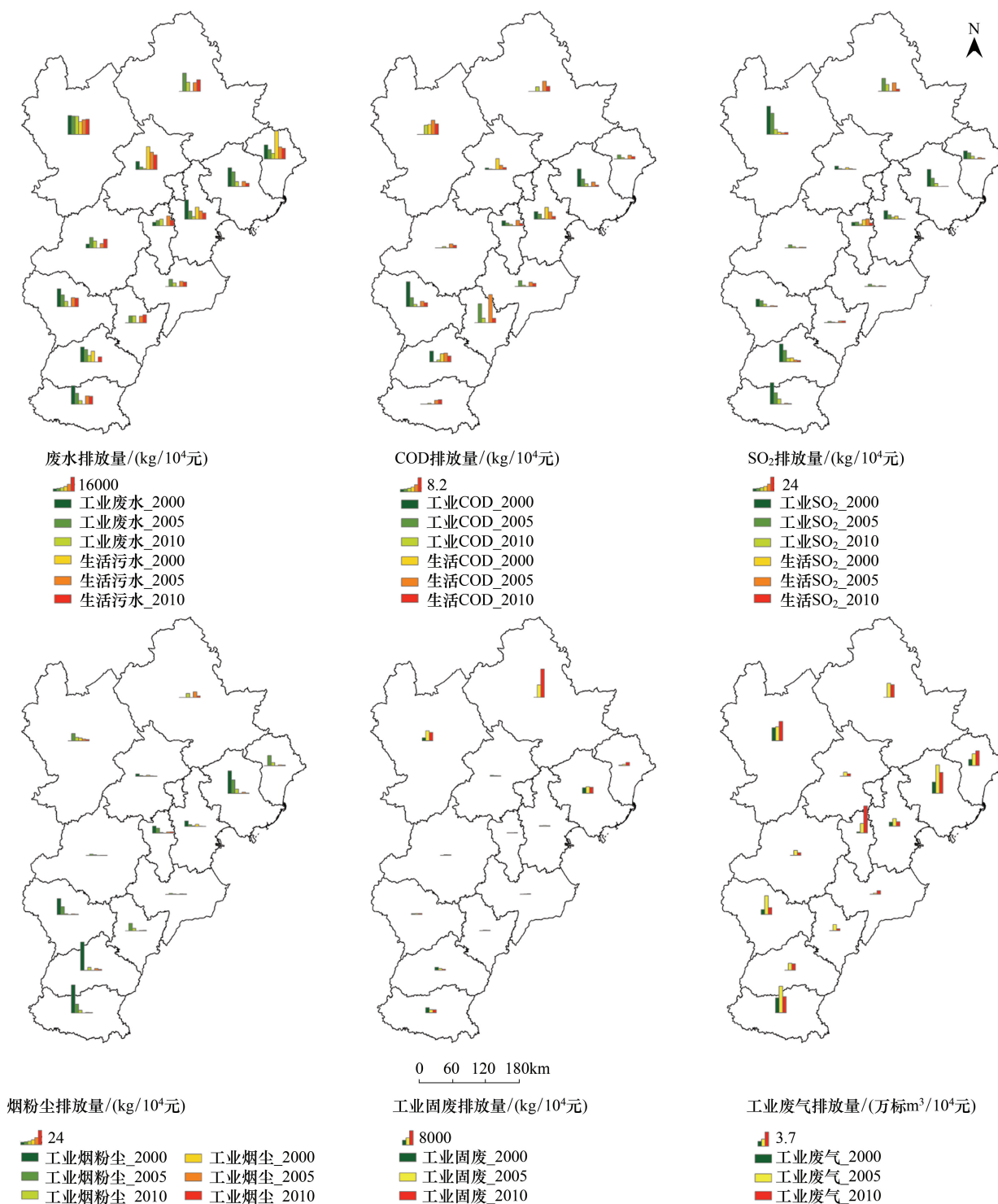


图4 京津冀地区单位 GDP 污染物排放空间差异及时间变化特征

Fig.4 Spatial and temporal variation of pollutants emissions per unit of GDP in Beijing-Tianjin-Hebei agglomeration

染物排放效率高于其它城市,具体表现为:

时间上,京津冀地区的单位 GDP 污染物排放量在逐渐降低,排放效率提高。北京市的单位 GDP 生活污染排放量虽然较高,但已经从 2000 年的 26700 kg/万元下降到 2010 年的 17000 kg/万元,排放效率提高明显。其它城市的单位 GDP 污染物排放量均有不同程度的下降。如天津的单位 GDP 生活烟尘排放量从 2000 年的

3.62 kg/万元下降到 2010 年的 0.16 kg/万元,排放效率提高了 21 倍。

空间上,除北京的单位 GDP 生活污水排放量较高外,北京、天津、保定、沧州等地的单位 GDP 污染物排放相对较低,污染物排放效率高于其它城市。在天津,虽然生活和工业污染物排放量较大,但单位 GDP 污染物排放量比石家庄、张家口、邯郸、邢台等城市相对较低。而在北京,由于排放量较大,生活污水排放效率平均在 21295 kg/万元之间,远高于地区 11914 kg/万元的平均水平。

2.2.3 污染物排放强度时空特征

与污染物人均排放及排放效率类似,污染物排放强度同样表现出明显的时空差异(图 5)。北京、天津的生活污染物排放强度高于其它城市,而天津、唐山的工业污染物排放强度高于其它城市。2000—2010 年间,生活污水、工业废气、工业固废排放强度有上升的趋势,而其它污染物排放强度呈下降的趋势,具体表现为:

时间上,2000—2010 年间,除生活污水外,工业废水、COD、SO₂、烟粉尘等污染物的排放强度总体呈下降的趋势,而工业固废、工业废气的排放强度在多数城市中呈上升趋势。其中,廊坊的工业废气排放强度增长最快,从 2000 年的 148 万标 m³/km²增长到 2010 年的 13104 万标 m³/km²,排放强度甚至超过唐山 2010 年的 12522 万标 m³/km²。

空间上,天津、唐山的工业污染排放强度高于其它地区,尤其是唐山市,各污染物的单位国土面积排放量均相对较高。而北京、天津的生活污染物排放强度高于其它城市。其中,北京市的生活污水排放强度为地区最高,平均达到 5.71×10^6 kg/km²,远高于区域平均 1.47×10^6 kg/km²;而天津的生活 COD 排放强度高于其它地区,平均达到 9969 kg/km²。

2.3 京津冀地区污染物排放与经济发达的 EKC 特征

在京津冀地区,随着城市人均 GDP 的增加,工业类污染物如工业 COD、工业烟粉尘等的排放量在逐渐下降。而工业废水、工业固废、工业废气、生活烟尘及生活 SO₂等污染物排放量则随着人均 GDP 的增加出现先上升后逐渐下降的趋势,呈现一定的 EKC 特征($R^2 < 0.5, P < 0.05$)(图 6)。结果显示,在京津冀地区,当人均 GDP 为 4 万元/人左右时出现 EKC 的拐点值,即人均 GDP 低于 4 万元/人时,污染物排放量有增加的趋势;当人均 GDP 高于 4 万元/人时,污染物排放量呈下降的趋势。到 2010 年,在京津冀地区人均 GDP 高于 4 万元/人的城市只有北京、天津和唐山,而其它城市除石家庄达到 3 万元/人外,其它城市均低于 3 万元/人,甚至在邯郸、邢台、张家口、承德及衡水等城市的人均 GDP 低于 2 万元/人。然而,虽然多数工业污染物排放呈现出一定的 EKC 特征,但京津冀地区的生活污水及生活污水中的 COD 排放量却仍在随着人均 GDP 的增长出现增加。

3 讨论

国家及各地区颁布的“减排”宏观政策对京津冀地区主要污染物排放的控制具有积极的作用。2000—2010 年,国家相继出台的“十五”和“十一五”计划明确提出污染物排放总量控制目标。尤其在“十一五”计划期间,首次将主要污染物排放的减排量作为国民经济和社会发展的约束性指标以来,全国范围内的 SO₂、COD 污染物排放量分别下降了 14.29% 和 12.45%。同时,京津冀地区各城市也出台了一系列污染物排放管理的政策和措施,如北京市的《北京市环境污染防治目标和对策》、天津市的“蓝天碧水工程”及河北省的《河北省减少污染物排放条例》等,广泛采取企业污染治理、产业结构调整、能源结构优化、餐饮油烟及秸秆焚烧整治、城乡绿化美化等措施,同时大力控制煤烟型污染、机动车尾气污染及扬尘污染,使京津冀地区范围内的工业废水、COD、SO₂、烟粉尘等污染物排放量呈逐渐下降的趋势。然而,由于污染物排放量较大,京津冀地区的污染物排放强度仍高于其它地区^[24]。

各项政策的实施使主要的传统污染物排放呈下降趋势,但京津冀地区的工业废气、工业固废排放量及生活污水仍在逐年增加,主要污染物发生变化。特别是工业废气,与燃煤、机动车排放物混合产生的 PM₁₀ 和 PM_{2.5} 等新型污染物已经取代 SO₂ 成为京津冀地区的主要污染物,严重影响到该地区的大气环境质量^[3,25]。但

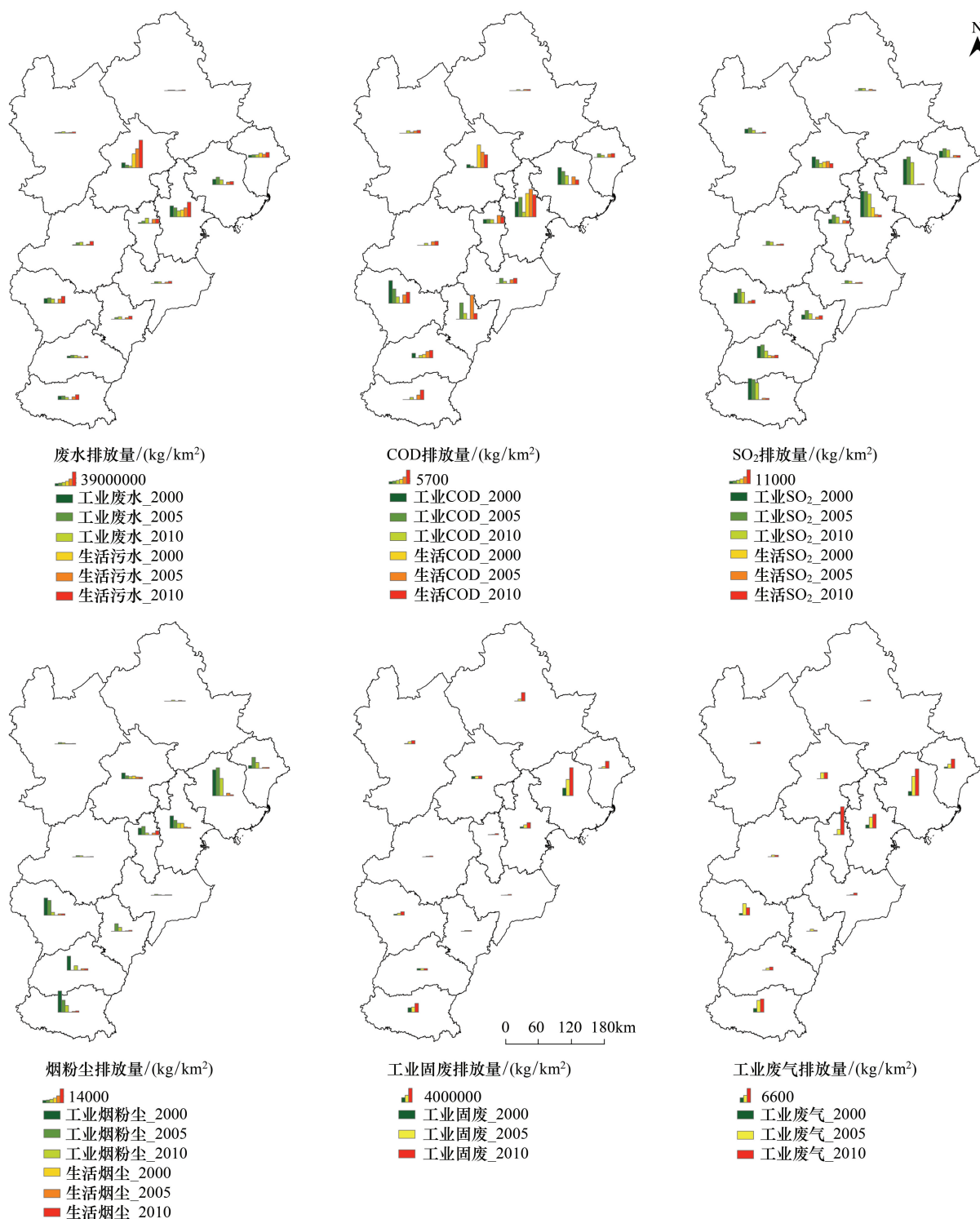


图5 京津冀地区单位国土面积污染物排放空间差异及时间变化特征

Fig.5 Spatial and temporal variation of pollutants emissions per unit of area in Beijing-Tianjin-Hebei agglomeration

是,由于城市发展及产业结构的差异,各城市的污染源不尽相同。如在北京,机动车尾气排放对大气影响最为明显。据统计,其对北京市的 PM_{10} 和 $\text{PM}_{2.5}$ 贡献率分别达到 23% 和 28%^[24];而天津及河北各城市的工业污染及燃煤对大气影响较为严重。如中国最大的钢铁生产基地——唐山市,钢铁产业对全市污染物排放量贡献率分别为氮氧化物 25%, SO_2 33%, PM_{10} 12%, $\text{PM}_{2.5}$ 19%^[24]。此外,由于大量的人口不断进入北京、天津等主要

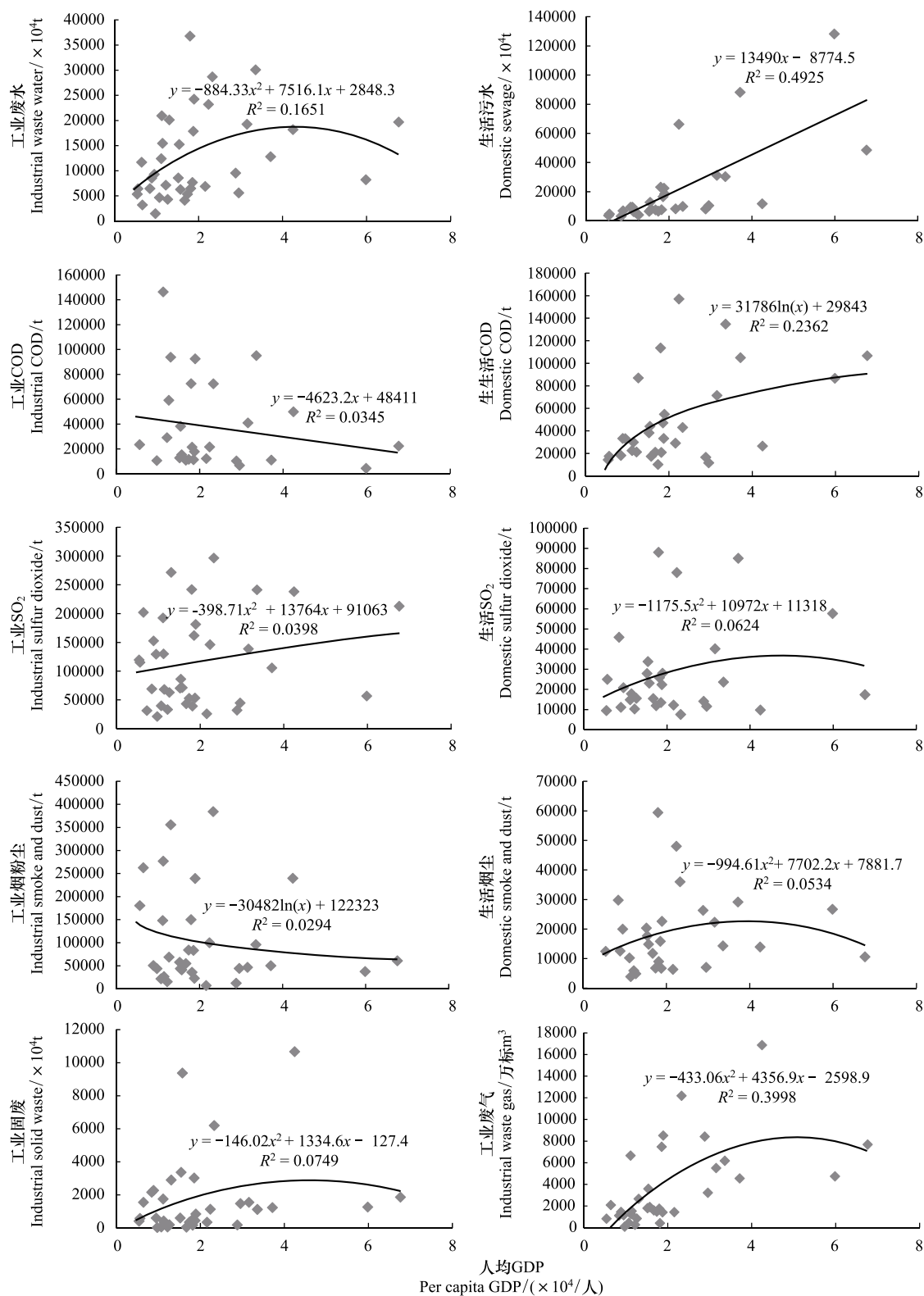


图6 人均GDP与污染物排放量之间的相关性

Fig.6 Relationships of pollutants emissions and per capita GDP in Beijing-Tianjin-Hebei agglomeration from 2000 to 2010

城市,致使这些城市的生活污染物,如生活污水及生活COD等,不仅排放量大,而且还有快速增加的趋势。大量的生活污染物排放到城市河流中,给城市河流生态系统带来了巨大的影响^[26-27]。

京津冀地区各城市污染物排放差异显著,因此在不同城市,污染物控制应有所侧重。为了区域协同发展战略的顺利进行,保证地区经济与生态环境的协调发展,京津冀地区采取联防联控的大气污染控制机制^[21],以及水污染防治及水资源的联合管理等方式^[2],以期解决区域性、复合型的生态环境问题。本文的研究结果显示,在进行大气污染物和水体污染物排放区域协同控制时,不同的城市,应该各有侧重。如北京市的生活废水及人均生活废水排放量在逐年增大,因此在京津冀地区内应该重点对北京的生活污水排放进行控制,如可以通过多建污水处理厂等设施以降低过量的生活污水排放^[28]。同时,进行适当的人口控制也有利于减少生活污水排放量。而唐山、天津、石家庄等工业污染物排放总量较大的城市,则可以通过环保投资及总量控制管理等机制加快技术升级改造及提高生产效率等方式降低工业污染物排放^[29]。

京津冀地区内经济发达城市的经济优势对环境保护的支持逐渐显现。随着经济的快速发展,人均 GDP 与污染物排放量呈现出一定的 EKC 特征,但效果还不明显(图 6)。在 2005 年—2010 年,当京津冀地区人均 GDP 达到 4 万元左右时,工业废水、生活烟尘、生活 SO₂、工业固废和工业废气排放量随人均 GDP 的增长出现下降的趋势,与吴玉萍等^[18]预测的时间基本一致。根据人均 GDP 及污染物排放确定 EKC 拐点已成为研究地区经济发展与环境污染关系的核心。但在不同区域,由于地区收入水平、环境容量、社会因素及地区环境政策、环境投资及公众环境意识等差别较大^[18],EKC 拐点有所不同。如 Selden 和 Song^[30]估计 SO₂和悬浮颗粒人均排放量的拐点应发生在 8000 美元左右,而 Panayotou^[31]估计它们的拐点分别在 2900 美元到 3800 美元之间。在京津冀地区的北京、天津和唐山等城市人均 GDP 达到 4 万元后,污染物排放量有下降的趋势。可能是随着经济总量的增加,这些城市更具环保投资能力,同时也改变了人们的传统消费理念和生活方式及促进了工业技术革新^[32]等原因,从而减少了污染物排放量,提高了污染排放效率,对京津冀地区的污染物控制起到了重要推动作用。

4 结论

本文选择 6 种典型污染物,以京津冀城市群的 13 个城市为研究对象,定量分析了污染物排放的时空特征,及其与经济发展的关系。主要结论包括:

(1) 2000—2010 年,随着城市化程度的提高,京津冀城市群的污染物排放呈下降趋势,尤其在“十一五”规划(2005—2010 年)期间,工业污染物排放下降明显。但由于各城市的城市化水平不同,主要污染物排放总量、排放效率及排放强度等均差异较大。人口规模较大的北京和天津,生活废水及生活 COD 的排放量、人均排放量和排放强度较高,而以工业发展为主的唐山、石家庄等城市,工业污染物的排放量、人均排放量及排放强度相对较高。

(2) 随着经济的快速增长,京津冀地区的主要污染物排放量与人均 GDP 呈现一定的环境库兹涅茨曲线特征,特别是 2005 年之后,由于“十一五”规划出台及在北京、天津及唐山市的人年均 GDP 相继达到 4 万元后,主要污染物的排放量下降明显。

由于城市化程度及经济发展模式存在差异,因此,在京津冀环境污染防治过程中,不论是大气污染防治的联防联控,还是水资源及水污染的联合管理,在不同城市应有所侧重,如生活污水排放方面应重点控制北京市的排放总量,而在工业污染排放方面应主要控制唐山等城市的排放量。同时,经济的快速发展可为污染防治提供所需的大量资金、防治技术的发展与先进的管理经验,加上京津冀区域一体化战略下强有力的环境政策支持,将为京津冀地区经济与环境协调发展提供良好的保障,有利于减缓京津冀地区的环境污染。

参考文献(References):

- [1] Bai X M, Shi P J, Liu Y S. Society: realizing China's urban dream. *Nature*, 2014, 509(7499): 158-160.
- [2] 吴健, 昌敦虎, 孙嘉轩. 京津冀一体化进程中的水环境保护策略. *环境保护*, 2014, 42(17): 34-37.
- [3] Han L J, Zhou W Q, Li W F. Increasing impact of urban fine particles (PM_{2.5}) on areas surrounding Chinese cities. *Scientific Reports*, 2015, (5): 1-6.

- [4] Wang M, Markert B, Chen W P, Peng C, Ouyang Z Y. Identification of heavy metal pollutants using multivariate analysis and effects of land uses on their accumulation in urban soils in Beijing, China. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2012, 184(10): 5889-5897.
- [5] Zhou W Q, Huang G L, Cadenasso M L. Does spatial configuration matter? Understanding the effects of land cover pattern on land surface temperature in urban landscapes. *Landscape and Urban Planning*, 2011, 102(1): 54-63.
- [6] Zhou W Q, Qian Y G, Li X M, Li W F, Han L J. Relationships between land cover and the surface urban heat island: seasonal variability and effects of spatial and thematic resolution of land cover data on predicting land surface temperatures. *Landscape Ecology*, 2014, 29(1): 153-167.
- [7] Pickett S T A, Zhou W Q. Global urbanization as a shifting context for applying ecological science toward the sustainable city. *Ecosystem Health and Sustainability*, 2015, 1(1): 1-15.
- [8] 邹秀萍, 陈劲锋, 苏利阳, 刘扬. 京津冀经济增长与水环境污染的实证分析. *生态经济*, 2009, (8): 40-42.
- [9] 张璐, 杨修群, 汤剑平, 房佳蓓, 孙旭光. 夏季长三角城市群热岛效应及其对大气边界层结构影响的数值模拟. *气象科学*, 2011, 31(4): 431-440.
- [10] Kuang W H. Evaluating impervious surface growth and its impacts on water environment in Beijing-Tianjin-Tangshan metropolitan area. *Journal of Geographical Sciences*, 2012, 22(3): 535-547.
- [11] 唐婷, 李超, 张雷, 吕坤, 周治国. 江苏省区域农业生态经济的时空变异分析. *生态学报*, 2014, 34(14): 4025-4036.
- [12] 杨芳, 潘晨, 贾文晓, 刘敏, 义白璐, 象伟宁. 长三角地区生态环境与城市化发展的区域分异性研究. *长江流域资源与环境*, 2015, 24(7): 1094-1101.
- [13] 马民涛, 梁增强, 杜改芳. 京津冀地区典型城市地表水质污染类型划分及驱动力研究. *四川环境*, 2014, 33(2): 53-57.
- [14] Grossman G M, Krueger A B. Environmental impacts of a North American free trade agreement. NBER Working paper No. w3914, 1991.
- [15] Panayotou T. Demystifying the environmental Kuznets curve: turning a black box into a policy tool. *Environment and Development Economics*, 1997, 2(4): 465-484.
- [16] Hilton F G H, Levinson A. Factoring the environmental Kuznets curve: evidence from automotive lead emissions. *Journal of Environmental Economics and Management*, 1998, 35(2): 126-141.
- [17] Harbaugh W T, Levinson A, Wilson D M. Reexamining the empirical evidence for an environmental Kuznets curve. *The Review of Economics and Statistics*, 2002, 84(3): 541-551.
- [18] 吴玉萍, 董锁成, 宋键峰. 北京市经济增长与环境污染水平计量模型研究. *地理研究*, 2002, 21(2): 239-246.
- [19] 包群, 彭水军. 经济增长与环境污染: 基于面板数据的联立方程估计. *世界经济*, 2006, (11): 48-58.
- [20] 韩旭. 中国环境污染与经济增长的实证研究. *中国人口·资源与环境*, 2010, 20(4): 85-89.
- [21] 宋强. 京津冀协同发展背景下的环境问题及解决对策. *中国经贸导刊*, 2014, (24): 59-62.
- [22] 黄金川, 方创琳. 城市化与生态环境交互耦合机制与规律性分析. *地理研究*, 2003, 22(2): 211-220.
- [23] 刘厚甫. 换算不变价格的两种方法比较. *中国统计*, 1985, (6): 26-28.
- [24] 赵斌. 华北地区大气污染源排放状况研究[D]. 北京: 中国气象科学研究院, 2007: 24-27.
- [25] 郭新彪, 魏红英. 大气 PM_{2.5} 对健康影响的研究进展. *科学通报*, 2013, 58(13): 1171-1177.
- [26] Walsh C J, Roy A H, Feminella J W, Cottingham P D, Groffman P M, Morgan II R P. The urban stream syndrome: current knowledge and the search for a cure. *Journal of the North American Benthological Society*, 2005, 24(3): 706-723.
- [27] Chen X, Zhou W Q, Pickett S T A, Li W F, Han L J, Ren Y F. Diatoms are better indicators of urban stream conditions: a case study in Beijing, China. *Ecological Indicators*, 2016, 60: 265-274.
- [28] Ongley E D, Zhang X L, Tao Y. Current status of agricultural and rural non-point source pollution assessment in China. *Environmental Pollution*, 2010, 158(5): 1159-1168.
- [29] 丁峰, 张阳, 李鱼. 京津冀大气污染现状及防治方向探讨. *环境保护*, 2014, 42(21): 55-57.
- [30] Selden T M, Song D Q. Environmental quality and development: is there a Kuznets curve for air pollution emissions?. *Journal of Environmental Economics and Management*, 1994, 27(2): 147-162.
- [31] Panayotou T. Empirical Tests and Policy Analysis of Environmental Degradation at Different Stages of Economic Development. Geneva: International Labor Office, 1993.
- [32] 王少剑, 方创琳, 王洋. 京津冀地区城市化与生态环境交互耦合关系定量测度. *生态学报*, 2015, 35(7): 2244-2254.