

引用格式:狄乾斌, 陈小龙, 侯智文. “双碳”目标下中国三大城市群减污降碳协同治理区域差异及关键路径识别[J]. 资源科学, 2022, 44(6): 1155-1167. [Di Q B, Chen X L, Hou Z W. Regional differences and key pathway identification of the coordinated governance of pollution control and carbon emission reduction in the three major urban agglomerations of China under the “Double-Carbon” targets[J]. Resources Science, 2022, 44(6): 1155-1167.] DOI: 10.18402/resci.2022.06.05

“双碳”目标下中国三大城市群减污降碳协同治理区域差异及关键路径识别

狄乾斌^{1,2}, 陈小龙¹, 侯智文²

(1. 辽宁师范大学地理科学学院, 大连 116029;

2. 辽宁师范大学海洋经济与可持续发展研究中心, 大连 116029)

摘要:城市群是中国区域经济与绿色发展的主要承载形式,其战略地位与日俱增,在实现碳中和、碳达峰目标下研究城市群减污降碳协同治理,是探索区域可持续发展的重要内容。基于减污降碳协同治理演化机理,借助2010—2019年三大城市群的面板数据,采用相关系数矩阵法、复合系统协同度模型测度城市群减污降碳协同治理协同度;结合基尼系数、变异系数、泰尔指数、引力模型等方法分析城市群减污降碳协同治理区域差异及空间联系强度;并对减污降碳协同治理关键路径进行识别。结果表明:①三大城市群减污降碳协同治理有序度呈显著增长趋势;而减污降碳协同治理协同度水平较低,系统处于不稳定、不协调的状态。②京津冀减污降碳协同治理度内部差异逐步减小,长三角内部差异基本保持稳定,珠三角内部差异波动较大。③京津冀和珠三角减污降碳协同治理协同度的网络密度和网络结构的复杂程度高于长三角,空间联系强度等级较高。为此,三大城市群减污降碳协同治理可以从政策、技术、能力建设等方面,通过做好顶层设计、转型升级、合作拓展等路径予以推进。

关键词:“双碳”目标;城市群;减污降碳;协同治理;空间联系;路径识别;复合系统协同度模型

DOI: 10.18402/resci.2022.06.05

1 引言

中国属于发展中工业化大国,面临着全球性气候变化挑战和传统型生态污染问题,生态环境保护的结构性、根源性、趋势性压力尚未根本解决,深入打好污染防治攻坚战、实现减污降碳的任务十分艰巨^[1]。面对环境污染与温室气体排放两个同根同源的问题,中国政府不断规划设计减污低碳发展路径和战略,在多个重要场合反复重申、强调^[2];明确把2030年前碳达峰目标和2060年前碳中和愿景纳入生态文明建设整体布局中,中国生态文明建设进入了减污降碳协同治理的新阶段^[3]。城市群是区域经济发展主要载体,也是污染和碳排放最为集中的区

域,从城市群的角度研究、规划和落实降污减碳协同治理,是探索区域可持续发展的重要内容^[4]。尤其是经济活力强、开放程度高的京津冀、长三角和珠三角城市群,其协同治理成效具有良好的典型示范效应^[5]。因此,梳理城市群减污降碳系统存在的问题和未来的重点工作领域,关注把握城市群及各城市减污降碳协同治理状态、协同治理合作关系及关键路径问题,为推动城市、区域和国家层面的污染物减少与碳排放达峰贡献力量。

对于碳排放问题的研究,国内外学者给予了高度关注,区域碳减排与环境协同治理的研究也在不断推进。①对于碳排放研究,主要围绕不同区域或

收稿日期:2021-12-01 修订日期:2022-03-25

基金项目:国家自然科学基金项目(42076222)。

作者简介:狄乾斌,男,山东滕州人,教授,博士生导师,主要研究方向为海洋经济地理学、区域发展与规划。E-mail: dqbwmm@163.com

通讯作者:陈小龙,男,河南永城人,硕士研究生,主要研究方向为海洋经济地理学、区域发展与规划。E-mail: 1535337702@qq.com

产业碳排放及效率的时空演变及驱动因素^[6]。如,莫惠斌等^[7]运用空间面板等模型对黄河流域县域碳排放时空格局与空间效应进行分析;王兆峰等^[8]对2010—2016年湖南省14个市(州)碳排放效率和环境效率进行测度和空间差异研究。②对于环境治理,早期研究主要采用废气、废水以及固体废物等单一污染物指标;近年来大多数学者采用多个指标探讨生态环境治理状态^[9,10]。如,蔡文博等^[11]对四大湾区生态环境质量和资源利用效率建立指标体系,构建湾区生态环境综合评价指数。③对于协同发展,当前学者运用协同理论从不同视角解释系统内外部协同状况及协同度测算^[12-14]。如,Haken^[15]最早提出协同理论,子系统通过协同推动整个系统从无序向有序发展;Beers等^[16]以澳大利亚奎那那经济区为例,分析经济、技术和环境协同发展的制约因素。④对于环境协同治理,开展较多CO₂排放、SO₂排放及排放协同关系研究^[17-19]。如,Akimoto等^[20]基于亚洲地区数据,研究CO₂、SO₂等污染物排放相关性和热点地区;陈菡等^[21]采取协同控制措施、协同管理体系和区域协同治理,分析协同治理关键制约因素,提出保障区域协同治理应对思路。综上,已有研究可在如下方面进一步拓展。首先,现有文献主要侧重环境污染治理或碳排放测度,立足于气候变化治理和环境协同治理研究较少;其次,已有研究更多地侧重于理论内涵的梳理讨论,对减污降碳协同治理这一新举措研究较为缺乏;再次,从城市群尺度和内部城市间规模和职能差异显著的异质现象的研究不足;最后,现有的研究方法主要侧重协同评估模型的优化升级,忽视对减污降碳协同治理内部子系统的协同分析。因此,本文尝试有以下突破:①将协同治理理论、区域碳排放、环境治理纳入统一框架分析,构建减污降碳协同治理评价指标体系;②运用复合系统协同度模型测度2010—2019年三大城市群各子系统内部的减污降碳协同治理有序度及整体协同度;③运用基尼系数和引力模型等揭示减污降碳协同治理协同度的区域差异与空间联系,最后识别其关键路径。本文旨在为城市群今后因地制宜地制定环境协同治理发展策略、提升生态质量提供参考。

2 研究区、研究框架与指标体系

2.1 研究区概况

在全球化、工业化、信息化快速发展的背景下,人口骤增、能源巨耗、交通高碳排放给城市带来了巨大压力,中国东部沿海三大城市群开发强度和程度较为强烈,成为生态环境问题高度集中区域。总体而言,在国家战略的推动下三大城市群空间组织紧凑、经济总量持续扩大、城市一体化程度高;要素流动、资源配置和信息共享等协同发展;产业结构在不断优化调整;资金、技术、人才也在不断集聚。统计年鉴和EPS中国城市数据库显示:三大城市群发展水平在全国城市群中居较高等级,从经济发展状况看,2020年三大城市群生产总值占全国近40%且年均增速突出;人均生产总值达13.8万元,是全国平均水平的1.96倍。从碳排放和环境状况看,三大城市群资源禀赋、经济发展、城市化阶段存在差异,因此碳排放量不同,总体呈先上升后下降的阶段性特征,与经济发展速度具有明显相关关系。随着中国环境政策的实行,碳排放增速有所放缓,大气状况明显改善,但环境治理投资和污染防治效果并不理想,三大城市群的能源约束和环境问题仍面临严峻挑战。

2.2 减污降碳协同治理演化机理与框架

所谓减污降碳协同治理,实质是生态环境治理从“先污染后治理”向“源头预防”和“源头治理”的转变,以经济高质量发展为引领,运用各种措施推进减污与减碳的转型发展,加快形成资源节约、环境友好的产业结构、能源结构、建筑结构和交通空间格局^[22]。

由图1可知,中国当前以重化工为主的产业结构、以煤为主的能源结构、以高耗材为主的建筑结构、以公路运输为主的交通结构等现状,产生能源消耗、工业生产、居民生活、建筑用能、物流转运和交通运输等人为活动,导致了环境污染物和温室气体的排放;环境污染物与温室气体具有一定的同根同源性,因此,减污降碳协同治理应该同频同效同路径;减污和降碳的目标、路径、管理手段和责任主体高度协同,因此,可通过这几方面的协同推动减污与降碳并举,推动减污降碳提质增效,进而推进

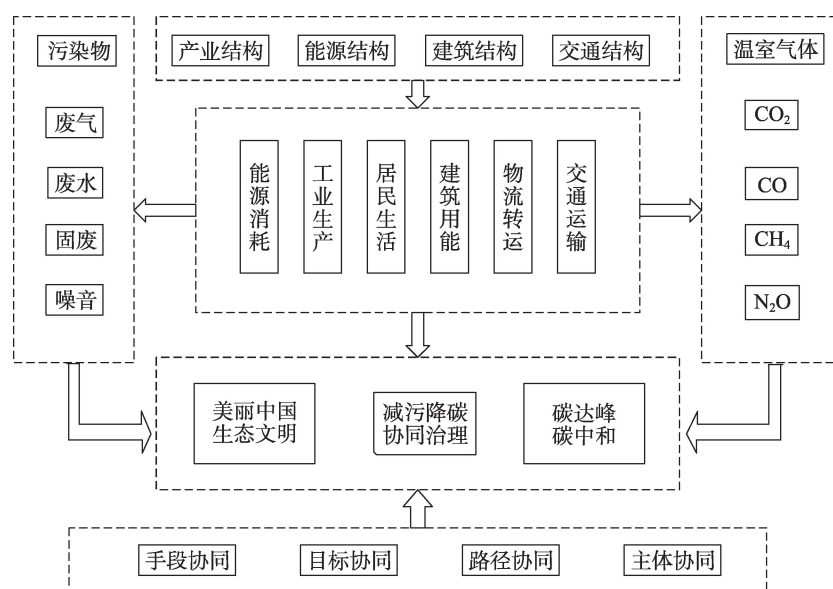


图1 减污降碳协同治理演化机理

Figure 1 Mechanism of change of coordinated governance of pollution control and carbon emission reduction

美丽中国建设、碳达峰碳中和目标实现。

减污降碳协同治理具有重大现实意义,是贯彻新发展理念、实现绿色低碳高质量发展、推动生产生活方式变革的根本动力和必然要求^[23]。

参考相关学者研究,本文将减污降碳协同治理描述为在减污降碳协同治理动态系统中,各子系统间相互作用,运用各种方式和手段推进污染物与碳减排的谋划、治理、执行、保护、考核等一体化。

三大城市群减污降碳协同治理系统包含环境污染、环境治理、生态保护、资源利用和经济发展5个子系统(图2)。其中,环境污染子系统衡量城市群发展过程中污染状况;环境治理子系统衡量减污降碳协同治理程度;生态保护子系统衡量减污降碳

过程中的生态保持状态;资源利用子系统衡量减污降碳过程中的资源利用效率;经济发展子系统则衡量减污降碳过程中的经济扶持力度。

2.3 减污降碳协同治理评价指标体系

城市群是城市化空间组织的主要形态,构成国家经济发展的重心,也是环境污染和碳排放最为集中的区域。城市群各城市行政协调、产业集聚、经济联系密切等特征促进城市群减污减碳,在环境污染与治理、能源和产业结构优化、生态环境统一协调、资源综合利用等方面更易统筹安排。以城市群减污降碳协同治理为总系统,城市减污降碳协同治理为子系统,环境污染、环境治理、生态保护、资源利用、经济发展5个方面为序参量,逐步对相关序参量筛选、优化、检验。参考相关研究^[24-26]的基础上,构建包括5个序参量和45个序变量的三大城市群减污降碳协同治理协同度评价指标体系(表1)。

(1)环境污染。充分考虑环境污染的全面性与复杂性,从大气、水体和土壤3个维度出发,选取NO_x排放总量、SO₂排放总量、烟(粉)尘排放总量、CO₂排放量、可吸入细颗粒物(PM_{2.5})年平均浓度、一般固体废弃物产生量、废水排放总量、氨氮排放量、化学需氧量9个指标为序变量,衡量大气、水体和土壤的受污染情况。

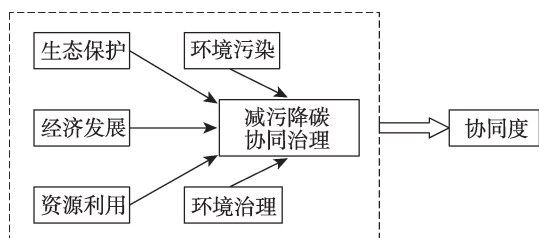


图2 三大城市群减污降碳协同治理协同度框架图

Figure 2 A framework of coordination degree of coordinated governance of pollution control and carbon emission reduction in the three major urban agglomerations of China

表1 三大城市群减污降碳协同治理协同度评价指标体系

Table 1 Evaluation indicator system for coordination degree of coordinated governance of pollution control and carbon emission reduction in the three major urban agglomerations of China

序参量	序变量	权重	序参量	序变量	权重
环境污染	NO _x 排放总量(-)	0.0251	资源利用	公园绿地面积(+)	0.0187
	SO ₂ 排放总量(-)	0.0283		城市绿地面积(+)	0.0228
	烟(粉)尘排放总量(-)	0.0258		水资源总量(+)	0.0238
	CO ₂ 排放量(-)	0.0213		年降水量(+)	0.0197
	可吸入细颗粒物(PM _{2.5})年平均浓度(-)	0.0283		电力消费量(-)	0.0230
	一般固体废弃物产生量(-)	0.0231		煤炭消费量(-)	0.0241
	废水排放总量(-)	0.0269		原油消费量(-)	0.0201
	氨氮排放量(-)	0.0262		液化石油气家庭用量(-)	0.0197
环境治理	化学需氧量(-)	0.0245		供水总量(-)	0.0248
	空气质量达到二级以上天数(+)	0.0221	经济发展	建设用地面积占土地面积的比例(-)	0.0220
	工业烟(粉)尘去除量(+)	0.0224		万元 GDP 能源消耗(-)	0.0276
	工业 SO ₂ 去除量(+)	0.0197		能源消费总量(-)	0.0207
	工业废水排放达标量(+)	0.0225		地区生产总值(+)	0.0186
	污水处理厂集中处理率(+)	0.0192		人均 GDP(+)	0.0192
	城镇生活污水处理率(+)	0.0194		GDP 增长率(+)	0.0276
	工业固废综合处理率(+)	0.0205		地区社会固定资产投资额(+)	0.0187
生态保护	城市垃圾无害化处理率(+)	0.0210		居民人均可支配收入(+)	0.0188
	环境污染治理投资额(+)	0.0203		社会消费品零售总额_市辖区(+)	0.0186
	环境空气质量指数(+)	0.0215		第二产业增加值占 GDP 比重(+)	0.0275
	生态环境状况指数(+)	0.0264		第三产业增加值占 GDP 比重(+)	0.0202
	建成区绿化覆盖面积(+)	0.0189		实际利用外资额(+)	0.0217
	森林覆盖率(+)	0.0213		城镇化率(+)	0.0189
	建成区绿化覆盖率(+)	0.0186			

注：“+”代表正向指标，“-”代表负向指标。

(2)环境治理。环境治理是城市可持续发展的核心部分,分别从水、气、固废、垃圾处理、污染治理投资等方面选取代表性指标。采用空气质量达到二级以上天数反映环境治理效果;采用工业烟(粉)尘去除量、工业 SO₂去除量、工业废水排放达标量、污水处理厂集中处理率、城镇生活污水处理率、城市垃圾无害化处理率反映对各类环境污染物的排放控制水平;采用工业固废综合处理率反映节能环保处理情况;采用环境污染治理投资额反映政府和社会对环境污染治理重视程度。

(3)生态保护。生态保护相关指标中,环境空气质量指数、生态环境状况指数反映大气环境及生态环境的环境质量状况;森林系统在减少温室气体排放方面起着无可替代的作用,选择建成区绿化覆盖面积、森林覆盖率指标、建成区绿化覆盖率、公园

绿地面积、城市绿地面积;水体的纳污能力与水资源的量级呈正相关,降水量越大,去除 SO₂、烟粉尘能力越强,因此选取年水资源总量、年降水量分别反映。

(4)资源利用。关注焦点集中在能源、水以及土地资源的利用状况上,分别采用电力消费量、煤炭消费量、原油消费量和液化石油气家庭用量反映能源消费结构状况;采用供水总量反映区域水资源利用的控制水平;采用建设用地面积占土地面积的比例反映土地资源利用效率;采用万元 GDP 能源消耗和能源消费总量反映能源利用效率。

(5)经济发展。主要表现为经济总量的扩大和发展质量的提升。其中,采用地区生产总值反映经济总量状况;采用人均 GDP 和 GDP 增长率分别衡量城市创造财富的水平和质量;采用地区社会固定

2022年6月

资产投资额衡量经济发展的方向;采用居民人均可支配收入、社会消费品零售总额反映国民消费能力;第二、三产业增加值占GDP比重反映城市经济结构优化结构;采用实际利用外资额反映外资对经济发展的贡献度;城镇化率是城市经济发展进步的重要标志,采用城镇化率反映城市管理水平。

3 研究方法与数据来源

3.1 研究方法

3.1.1 指标权重测度方法

为避免主观因素的影响,采用相关系数矩阵法测度权重。假设指标体系 n 个指标,它们的相关矩阵 \mathbf{x} 为^[27]:

$$\mathbf{x} = \begin{bmatrix} a_{11} & \cdots & a_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1} & \cdots & a_{nn} \end{bmatrix}, x_i = \sum_{j=1}^n |a_{ij}| - 1, i=j=1, 2, \dots, n \quad (1)$$

式中: a_{ij} 表示第 j 个城市的第 i 个指标; x_i 表示 i 指标对 $n-1$ 指标的总影响, x_i 值越大,代表 x_i 对整个指标体系越重要,需赋予越大的权重,故将 x_i 归一化便可得到各指标的权重 θ_i :

$$\theta_i = \frac{x_i}{\sum_{i=1}^n x_i}, i=1, 2, \dots, n \quad (2)$$

3.1.2 复合系统协同度模型

(1)子系统有序度。 T_{wk} 为减污降碳协同治理的序参量,基于序参量对减污降碳协同治理系统有序度的正负影响,分为正向和负向的序参量,正向序参量取值越大,系统有序度越高,负向序参量取值越大,系统有序度越低, T_{wk} 序参量有序度计算公式如下^[28]:

$$U_w(T_{wk}) = \begin{cases} \text{当 } T_{wk} \text{ 为正向序参量时, } \frac{T_{wk} - b_{wk}}{a_{wk} - b_{wk}} \\ \text{当 } T_{wk} \text{ 为负向序参量时, } \frac{a_{wk} - T_{wk}}{a_{wk} - b_{wk}} \end{cases} \quad (3)$$

式中: $U_w(T_{wk})$ 表示序参量有序度, $U_w(T_{wk}) \in [0, 1]$,取值越大,子系统减污降碳协同治理协同性越好; $T_{wk} \in [a_{wk}, b_{wk}]$, a_{wk} 、 b_{wk} 分别表示减污降碳协同治理第 w 个子系统的第 k 个序变量的最小值和最大值;城市子治理系统 T_w 的有序度可通过 $U_w(T_{wk})$ 加总求和获得,公式如下:

$$U_w(T_w) = \sum_{k=1}^n U_w(T_{wk}) \times P_w \quad (4)$$

式中: $U_w(T_w)$ 表示子系统有序度; P_w 表示权系数, $P_w \geq 0$ 且 $\sum_{w=1}^n P_w = 1$ 。

(2)复合系统协同度。设定从初始时刻 t_0 发展到时刻 t_1 ,则各城市子治理系统的有序度为 $U_w^0(T_w)$ 、 $U_w^1(T_w)$,从 t_0 到 t_1 时刻的减污降碳复合协同治理系统的整体协同度为^[24]:

$$F = \beta \sum_{w=1}^n \gamma_w [U_w^1(T_w) - U_w^0(T_w)]$$

$$\beta = \frac{\min[U_w^1(T_w) - U_w^0(T_w)]}{|\min[U_w^1(T_w) - U_w^0(T_w)]|} \quad (5)$$

式中: F 表示复合系统协同度,值越大代表协同程度越高; β 表示系统协同度的稳定性,当 $\beta < 0$ 时,表示系统整体处于不稳定或不协同状态, $\beta > 0$ 处于正协同状态; γ_w 表示权重系数。复合系统协同度相对于基期2010年数值计算^[29]。

3.1.3 减污降碳协同治理区域差异测度方法

采用基尼系数(Gini)、泰尔指数(TB)和变异系数(CV)从整体上分析三大城市群减污降碳协同治理协同度的城市群差异,具体计算公式如下^[30]:

$$Gini = \frac{-(s+1)}{s} + \frac{2}{s^2 y} \sum m y_m \quad (6)$$

$$TB = \frac{1}{s} \sum_{i=1}^s \frac{y_m}{u} \ln \frac{\bar{y}_m}{u} \quad (7)$$

$$CV = \frac{\sqrt{\frac{1}{s} \sum_{m=1}^s (x_m - \bar{x}_m)^2}}{\bar{x}_m} \quad (8)$$

式中: s 表示样本数; x_m 、 y_m 与 \bar{x}_m 、 \bar{y}_m 分别表示第 m 个样本的指标值和所有样本指标值平均值;本文对TB进一步分解,分解为城市群内差距、城市群间差距,分解方法如下^[31]:

$$TB = T_{BL} + T_{BD} = \sum_q f_q \ln \frac{u_q}{u} + \sum_q f_q \frac{u_q}{u} \ln \frac{u_q}{u} \quad (9)$$

式中: u_q 表示第 q 城市群城市的减污降碳协同治理协同度值; u 表示减污降碳协同治理协同度平均值; f_q 为第 q 城市群城市个数与城市总数的比值; T_{BL} 表示组内差异; T_{BD} 表示组间差异。

3.1.4 协同治理空间联系引力模型

根据上述减污降碳协同治理研究机理,本文认为城市减污降碳协同治理空间联系强度越大,则地

区间的协同治理度越高。通过构建协同治理空间联系的引力模型测度三大城市群减污降碳协同治理度的相互作用,模型如下^[32,33]:

$$R_{ef} = g \frac{D_e D_f}{T_{ef}^2} \quad (10)$$

式中: R_{ef} 表示城市群减污降碳协同治理的空间联系强度; D_e 和 D_f 表示城市 e 和 f 协同治理协同度; T_{ef} 表示城市间的距离; g 表示引力常数,一般为1。

3.2 数据来源

城市群作为区域乃至国家的新经济增长极,是提升竞争力能力的重要源泉。高水平的城市群减污降碳协同治理中凸显了城市资金、集聚、技术、创新优势,对于促进城市经济一体化与高质量发展,打造区域创新增长极,构建和完善国家经济内循环体系都具有重要意义。本文以京津冀城市群(13个城市)、长三角城市群(26个城市)和珠三角城市群(14个城市)^①为研究对象。各评价指标的原始数据来源于2011—2020年《中国统计年鉴》《中国能源统计年鉴》《中国环境统计年鉴》《中国城市统计年鉴》及各省、市统计年鉴,水资源公报,国民经济和社会发展统计公报。计量统计采用Stata14.0和ArcGIS等分析软件。

4 结果与分析

4.1 减污降碳协同治理有序度及协同度测算

依据三大城市群减污降碳协同治理的模式和特征,为更好地反映子系统的各序参量及整体有序度,运用相关系数矩阵法测算各序参量的权重。考虑各序参量的量纲不同,对原始数据进行无量纲化处理,将数据运用到公式(3)得到各序参量的有序度,然后根据相关系数矩阵法确定的指标权重代入公式(4),得到2010—2019年三大城市群减污降碳协同治理系统的有序度(图3)。

由图3可知,2010—2019年三大城市群减污降碳协同治理系统有序度呈显著增长趋势,上升速度均较快,说明减污降碳协同治理系统协同作用在不

断增强,城市经济发展与生态环境保护工作成效正在加速显现。不同城市群有序度增长速度存在一定差异,长三角城市群有序度增长最为迅速,京津冀、珠三角次之。长三角各城市有序度在研究期间由低值区转为高值区的占比较大,如杭州、绍兴、泰州、宁波、台州、上海、湖州表现最为明显;京津冀整体受国家政策影响,有序度较高,其中,北京、天津、石家庄等最为显著;珠三角整体有序度较低,增长潜力最大,如广州、深圳等城市。

三大城市群减污降碳协同治理系统具有不同阶段特征,为准确反映整体减污降碳协同治理的状态,以2010年为研究基期、各子系统有序度总值指标为变量,按照公式(5)计算得到三大城市群减污降碳协同治理协同度,受篇幅限制仅展示城市群及部分城市(表2)。

总体看,三大城市群减污降碳协同治理协同度水平较低,表明三大城市群内部不协调,更深层次的作用机制尚未形成,协同度整体波动大,系统处于不稳定、不协调的状态。从变动趋势看,长三角城市群协同度增长的速度最快,京津冀城市群次之,珠三角城市群增长速度最慢。京津冀城市群协同度在2011—2019年间波动最大,尤其是在2014—2015年间,协同度由最高值跌入最小值,2015年后协同度一直处于上升的趋势;长三角城市群协同度整体处于波动上升趋势,2011—2014年由于经济发展造成的环境污染压力大,导致协同度处于下滑状态,2014年开始缓慢上升;珠三角城市群协同度与前两者相比处于较稳定的状态,整体波动较小。

4.2 减污降碳协同治理协同度区域差异

由2011—2019年减污降碳协同治理协同度基尼系数、变异系数计算结果(图4)可知,三大城市群协同度差异明显。京津冀城市群协同度内部差异逐步减小,2011—2015年基尼系数和变异系数分别由0.11和0.19减小至0.07和0.13;长三角城市群协同度内部差异基本保持稳定,基尼系数和变异系数分别介于0.02~0.21和0.06~0.65之间;珠三角城市群协同度内部差异最大,基尼系数和变异系数分别

① 京津冀城市群包括北京、天津、石家庄、唐山、秦皇岛、邯郸、邢台、保定、张家口、承德、沧州、廊坊、衡水13个城市;长三角城市群包括上海、南京、无锡、常州、苏州、南通、盐城、扬州、镇江、泰州、杭州、宁波、嘉兴、湖州、绍兴、金华、舟山、台州、合肥、芜湖、马鞍山、铜陵、安庆、滁州、池州、宣城26个城市;珠三角城市群包括广州、深圳、佛山、东莞、惠州、中山、珠海、江门、肇庆、韶关、汕尾、河源、清远、云浮14个城市。

2022年6月

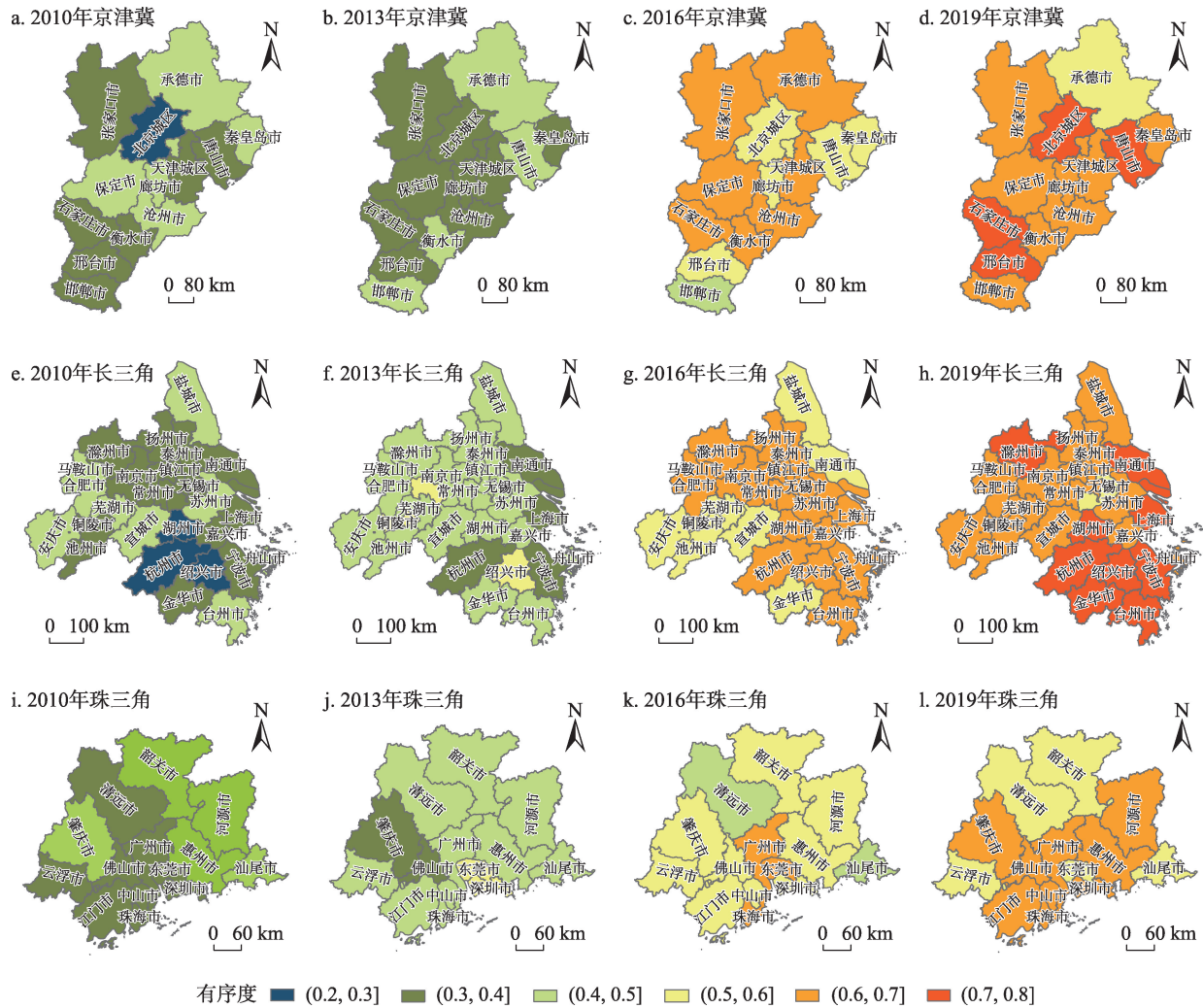


图3 2010—2019年三大城市群减污降碳协同治理有序度

Figure 3 Orderliness of the coordinated governance system for pollution control and carbon emission reduction in the three major urban agglomerations of China, 2010-2019

注:基于自然资源部标准地图服务网站GS(2020)4619号标准地图制作,底图无修改。

由谷值0.04和0.07增加至峰值0.29和0.67。三大城市群各城市处于不同的发展阶段,各城市的环境污染、环境治理、经济发展水平差异较大导致减污降碳协同治理压力较大。

通过公式(7)、(9)计算所得结果见表3。京津冀协同度的泰尔指数呈波动下降趋势,2011—2016年处于先升后降的态势,2016—2017年快速上升,之后年份总体呈下降态势,说明减污降碳协同治理的区域差异呈较大幅度变化之后又趋于平稳下降,整体差异不明显;长三角协同度的泰尔指数处于波动变化趋势,2015年处于最低值0.032,2014年达到峰值0.349;珠三角协同度的泰尔指数整体处于波动

上升趋势,在2011—2016年处于平稳状态,2016年达到低谷值0.003,2018年达到峰值0.741。横向对比看,2011—2019年协同度的泰尔指数差异呈现珠三角、京津冀、长三角城市群递减的分布状态。整体上,区域内贡献率均值达90%以上,是形成区域差异的主要原因。

4.3 减污降碳协同治理协同度空间联系

根据公式(10)测算三大城市群2011、2015和2019年减污降碳协同治理协同度的空间联系强度。将三大城市群各城市之间协同度的空间联系强度以自然间断点分级法为尺度标准划分为5个等级,并利用ArcGIS 10.2绘制出协同度空间联系的网

表2 2011—2019年三大城市群减污降碳协同治理协同度

Table 2 Coordination degree of coordinated governance of pollution control and carbon emission reduction in the three major urban agglomerations of China, 2011-2019

	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019
北京	0.020	0.046	-0.123	0.034	0.027	-0.023	-0.035	-0.021	-0.035
天津	-0.058	0.022	0.065	-0.023	0.035	0.046	-0.051	-0.019	-0.177
石家庄	-0.326	0.020	-0.148	0.030	-0.040	0.028	-0.078	0.052	-0.037
京津冀	0.163	-0.215	0.030	0.078	-0.337	-0.299	-0.224	-0.214	0.147
上海	0.042	0.022	-0.039	-0.028	-0.022	0.039	-0.026	0.019	-0.023
杭州	-0.024	0.026	0.072	-0.051	0.044	-0.050	0.109	0.018	0.048
宁波	0.107	-0.040	0.024	0.029	-0.037	0.038	0.114	0.017	0.014
长三角	0.012	0.079	-0.017	-0.035	0.049	0.106	-0.007	0.040	0.048
广州	-0.046	0.018	0.055	0.024	0.025	-0.018	0.073	0.079	-0.042
深圳	0.013	-0.023	-0.043	-0.034	-0.028	-0.093	-0.177	-0.043	0.097
珠海	0.039	0.066	-0.061	0.054	0.037	-0.039	0.098	-0.068	-0.023
珠三角	-0.026	0.025	-0.002	-0.011	-0.014	-0.056	0.014	-0.010	-0.028

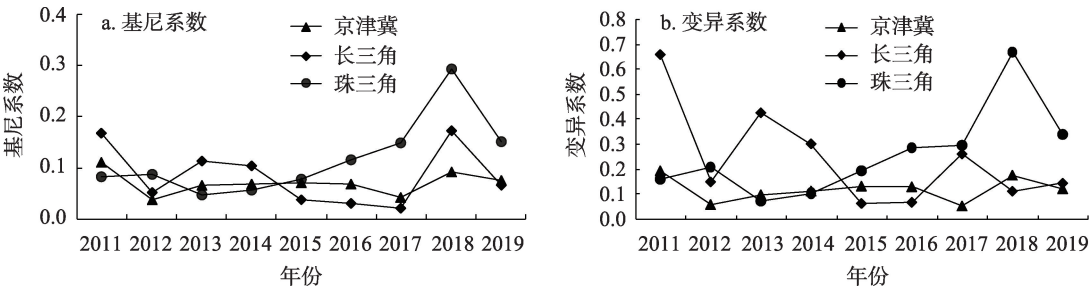


图4 2011—2019年三大城市群减污降碳协同治理协同度基尼系数(a)与变异系数(b)

Figure 4 Gini coefficient (a) and coefficient of variation (b) of coordinated governance of pollution control and carbon emission reduction in the three major urban agglomerations of China, 2011-2019

表3 2011—2019年三大城市群减污降碳协同治理协同度泰尔指数及其分解

Table 3 Theil index and decomposition of the coordination of pollution control and carbon emission reduction governance of the three major urban agglomerations of China, 2011-2019

年份	京津冀	长三角	珠三角	区域内	区域间	贡献率/%	
						区域内	区域间
2011	0.211	1.616	0.473	0.932	0.007	99.30	0.70
2012	0.156	0.269	0.268	0.156	0.000	99.75	0.25
2013	0.285	0.812	0.160	0.367	0.005	98.55	1.45
2014	0.057	0.393	0.088	0.247	0.002	99.25	0.75
2015	0.152	0.032	0.350	0.165	0.001	99.14	0.86
2016	0.008	0.284	0.003	0.274	0.002	99.21	0.79
2017	0.180	0.349	0.249	0.418	0.003	99.35	0.65
2018	0.101	0.207	0.741	0.481	0.001	99.84	0.16
2019	0.199	0.115	0.029	0.343	0.001	99.57	0.43

络结构(图5)。

从三大城市群的空间联系网络结构看,京津冀城市群和珠三角城市群的网络密度和网络结构的

复杂程度高于长三角城市群,空间联系强度等级高的占比较多。从整体形态看,长三角城市群减污降碳协同治理的空间联系逐渐增强,相对于京津冀和

2022年6月

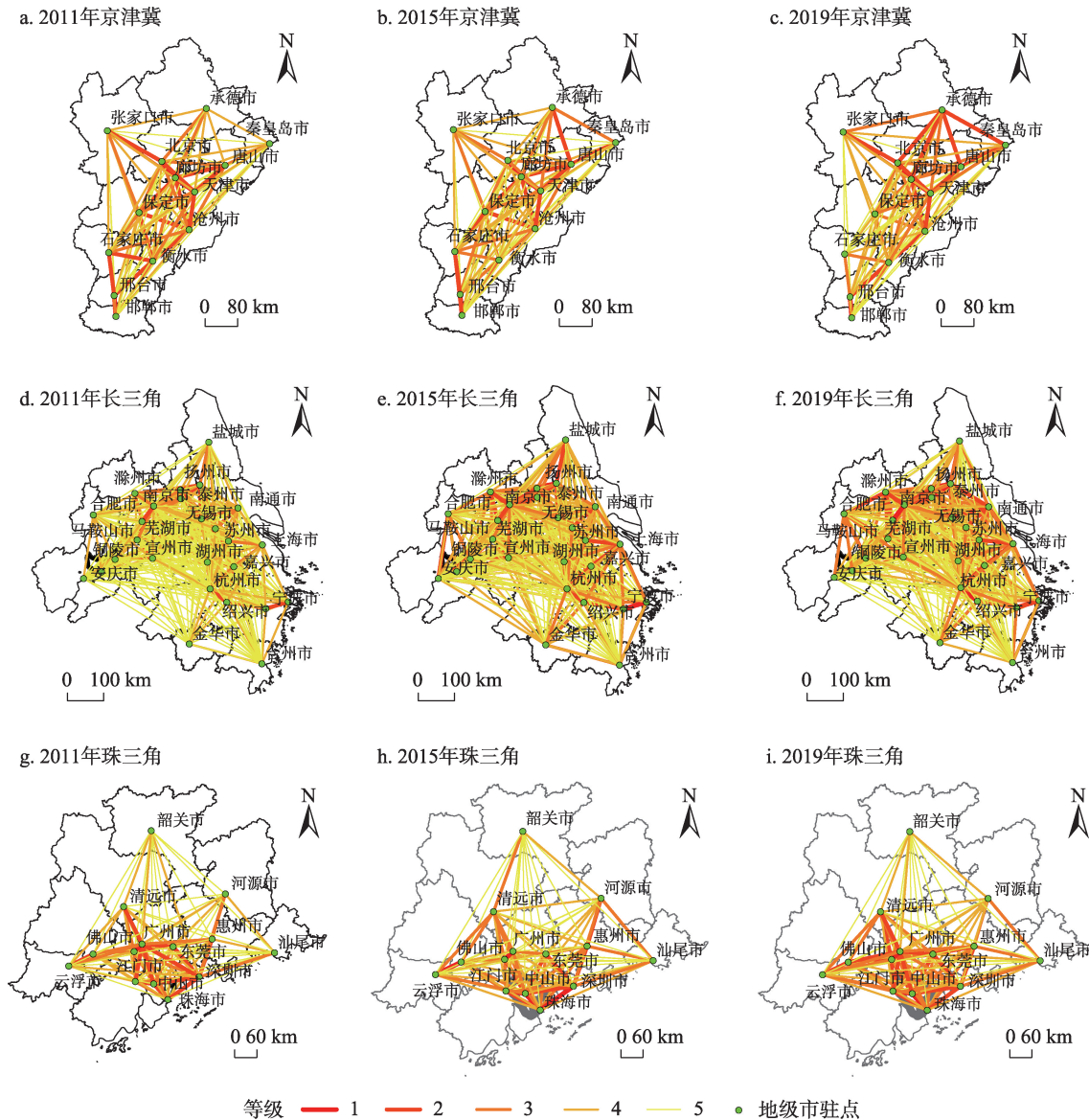


图5 2011—2019年减污降碳协同治理协同度空间联系强度的网络结构

Figure 5 Network structure of spatial connection strength of synergy degree of pollution reduction and carbon reduction, 2011-2019

注：基于自然资源部标准地图服务网站GS(2020)4619号标准地图制作，底图无修改。

珠三角城市群表现较明显,这是由于长三角一体化政策的影响,环境污染治理水平提高,促进了各城市之间协同治理。2011年京津冀城市群中北京和天津空间联系强度等级最大,对邻近城市空间联系强度产生较大影响,邯郸、邢台等城市空间联系强度较小;长三角城市群仅南京、苏州、上海、宁波和舟山等城市的空间联系强度较强;2019年,珠三角城市群中广州、深圳等城市已经开始进入后工业化阶段,协同治理水平较高导致减污降碳协同治理空间联系强度高。2019年,以北京-天津连线、南京-

常州-无锡连线、杭州-嘉兴-上海连线、宁波-舟山连线、广州-深圳连线为中心的城市网络密集分布核心区域,组团发展现象逐渐明显,进一步向邻近城市蔓延。与城市总体经济实力、科技创新、辐射能力和协同治理水平高度正相关。一方面,京津冀城市群以重化工业为主的张家口、承德、唐山和邢台,其高污染行业占比大幅降低;另一方面,北京、天津、河北3地区逐步打通体制机制界限,加大工业污染源防治力度,注重节能减排和资源综合利用,促使减污降碳协同治理协同度的提升。同时,珠三

2022年6月

理有序度呈显著增长趋势,上升速度较快,减污降碳协同治理系统协同作用在不断增强,城市经济发展与生态环境保护工作成效正在加速显现;但减污降碳协同治理协同度水平较低,更深层次的作用机制尚未形成,系统处于不稳定、不协调的状态。

(2)利用基尼系数、变异系数分别测度的三大城市群减污降碳协同治理区域差异结论相对一致;京津冀城市群减污降碳协同治理协同度内部差异逐步减小,长三角城市群减污降碳协同治理协同度内部差异基本保持稳定,珠三角城市群减污降碳协同治理协同度内部差异波动较大;泰尔指数及其分解结果显示京津冀和长三角呈波动下降趋势,珠三角整体处于波动上升趋势;减污降碳协同治理协同度差异呈现珠三角、京津冀、长三角城市群递减的分布状态,造成区域差异的主要原因是区域内差异。

(3)京津冀城市群和珠三角城市群的网络密度和网络结构的复杂程度高于长三角城市群,空间联系强度等级较高。长三角城市群减污降碳协同治理的空间联系较高,以南京、镇江等苏南城市为中心,与其他城市联动发展。

参考文献(References):

- [1] 王少剑,高爽,黄永源,等.基于超效率SBM模型的中国城市碳排放绩效时空演变格局及预测[J].地理学报,2020,75(6): 1316-1330. [Wang S J, Gao S, Huang Y Y, et al. Spatio-temporal evolution and trend prediction of urban carbon emission performance in China based on super-efficiency SBM model[J]. Acta Geographica Sinica, 2020, 75(6): 1316-1330.]
- [2] 吕望舒.广泛深入开展碳达峰行动 共同构建人与自然生命共同体[N].中国环境报,2021-04-28(01). [Lv W S. Carry Out Extensive and In-Depth Carbon Peaking Actions to Jointly Build a Community of Human and Natural Life[N]. China Environment News, 2021-04-28(01).]
- [3] 郑逸璇,宋晓晖,周佳,等.减污降碳协同增效的关键路径与政策研究[J].中国环境管理,2021,13(5): 45-51. [Zheng Y X, Song X H, Zhou J, et al. Synergetic control of environmental pollution and carbon emissions: Pathway and policy[J]. Chinese Journal of Environmental Management, 2021, 13(5): 45-51.]
- [4] 任梅,王小敏,刘雷,等.中国沿海城市群环境规制效率时空变化及影响因素分析[J].地理科学,2019,39(7): 1119-1128. [Ren M, Wang X M, Liu L, et al. Spatio-temporal change and influencing factors of environmental regulation in China's coastal urban agglom-

erations[J]. Scientia Geographica Sinica, 2019, 39(7): 1119-1128.]

- [5] 张国俊,王珏哈,吴坤津,等.中国三大城市群经济与环境协调度时空特征及影响因素[J].地理研究,2020,39(2): 272-288. [Zhang G J, Wang Y H, Wu K J, et al. Spatial-temporal characteristics and influencing factors of coordination between economic and environmental development of three major urban agglomerations in China[J]. Geographical Research, 2020, 39(2): 272-288.]
- [6] 蔺雪芹,边宇,王岱.京津冀地区工业碳排放效率时空演化特征及影响因素[J].经济地理,2021,41(6): 187-195. [Lin X Q, Bian Y, Wang D. Spatiotemporal evolution characteristics and influencing factors of industrial carbon emission efficiency in Beijing-Tianjin-Hebei Region[J]. Economic Geography, 2021, 41(6): 187-195.]
- [7] 莫惠斌,王少剑.黄河流域县域碳排放的时空格局演变及空间效应机制[J].地理科学,2021,41(8): 1324-1335. [Mo H B, Wang S J. Spatio-temporal evolution and spatial effect mechanism of carbon emission at county level in the Yellow River Basin[J]. Scientia Geographica Sinica, 2021, 41(8): 1324-1335.]
- [8] 王兆峰,杜瑶瑶.基于SBM-DEA模型湖南省碳排放效率时空差异及影响因素分析[J].地理科学,2019,39(5): 797-806. [Wang Z F, Du Y Y. Spatial-temporal differences and influencing factors of carbon emission efficiency in Hunan Province based on SBM-DEA Model[J]. Scientia Geographica Sinica, 2019, 39(5): 797-806.]
- [9] 杨泽康,田佳,李万源,等.黄河流域生态环境质量时空格局与演变趋势[J].生态学报,2021,41(19): 7627-7636. [Yang Z K, Tian J, Li W Y, et al. Spatio-temporal pattern and evolution trend of ecological environment quality in the Yellow River Basin[J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(19): 7627-7636.]
- [10] 张甘霖,朱永官,傅伯杰.城市土壤质量演变及其生态环境效应[J].生态学报,2003, (3): 539-546. [Zhang G L, Li Y G, Fu B J. Quality changes of soils in urban and suburban areas and its eco-environmental impacts: A review[J]. Acta Ecologica Sinica, 2003, (3): 539-546.]
- [11] 蔡文博,韩宝龙,逯非,等.全球四大湾区生态环境综合评价研究[J].生态学报,2020,40(23): 8392-8402. [Cai W B, Han B L, Lu F, et al. Comprehensive evaluation of the eco-environment in the four global bay areas[J]. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(23): 8392-8402.]
- [12] 王世豪,黄麟,徐新良,等.粤港澳大湾区生态系统服务时空演化及其权衡与协同特征[J].生态学报,2020,40(23): 8403-8416. [Wang S H, Huang L, Xu X L, et al. Spatial and temporal evolution of ecosystem services and its trade-offs and synergies in Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area[J]. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(23): 8403-8416.]
- [13] 邵汉华,刘克冲,齐荣.中国现代产业体系四位协同的地区差异及动态演进[J].地理科学,2019,39(7): 1139-1146. [Shao H H, Liu K C, Qi R. Regional differences and dynamic evolution of the quaternary cooperation of modern industrial system in China[J]. Scientia Geographica Sinica, 2019, 39(7): 1139-1146.]
- [14] Persaud A. Enhancing synergistic innovative capability in multina-

- tional corporations: An empirical investigation[J]. *Journal of Product Innovation Management*, 2005, 22(5): 412-429.
- [15] Haken H. Synergetics: Introduction and Advanced Topics[M]. Berlin: Springer Berlin Heidelberg, 2004.
- [16] Beers D V, Biswas W. A regional synergy approach to energy recovery: The case of the Kwinana Industrial Area, Western Australia [J]. *Energy Conversion and Management*, 2008, 49(11): 3051-3062.
- [17] Gregory P J, Ingram J S I. The contribution of the Soil Organic Matter Network (SOMNET) to GCTE[J]. *Evaluation of Soil Organic Matter Models*, 1996, 38: 13-26.
- [18] 张金亭, 赵玉丹, 田扬戈, 等. 大气污染物排放量与颗粒物环境空气质量的空间非协同耦合研究: 以武汉市为例[J]. *地理科学进展*, 2019, (4): 612-624. [Zhang J T, Zhao Y D, Tian Y G, et al. Spatial non-coupling of air pollutant emissions and particulate matter-related air quality: A case study in Wuhan City, China[J]. *Progress in Geography*, 2019, (4): 612-624.]
- [19] 刘华军, 彭莹. 雾霾污染区域协同治理的“逐底竞争”检验[J]. *资源科学*, 2019, 41(1): 185-195. [Liu H J, Peng Y. “Race to the bottom” test of collaborative management in haze pollution area [J]. *Resources Science*, 2019, 41(1): 185-195.]
- [20] Akimoto H, Narita H. Distribution of SO₂, NO_x and CO₂ emissions from fuel combustion and industrial activities in Asia with 1°×1° resolution[J]. *Atmospheric Environment*, 1994, 28(2): 213-225.
- [21] 陈菡, 陈文颖, 何建坤. 实现碳排放达峰和空气质量达标的协同治理路径[J]. *中国人口·资源与环境*, 2021, 30(10): 12-18. [Chen H, Chen W Y, He J K. Pathway to meet carbon emission peak target and air quality standard for China[J]. *China Population, Resources and Environment*, 2021, 30(10): 12-18.]
- [22] 王雨彤. “双碳”背景下中国减污降碳协同治理的法治化路径[J]. *世界环境*, 2021, (4): 88-89. [Wang Y T. China's path to the legalization of coordinated treatment for pollution reduction and carbon reduction in the context of emission peak and carbon neutrality[J]. *World Environment*, 2021, (4): 88-89.]
- [23] 姜华. 推动减污降碳协同增效, 共促人与自然和谐共生[N]. *中国环境报*, 2021-09-06(03). [Jiang H. Promote the Synergy of Pollution Reduction and Carbon Reduction, and Promote the Harmonious Coexistence of Man and Nature[N]. *China Environment News*, 2021-09-06(03).]
- [24] 孙丽文, 任相伟. 京津冀区域碳排放协同治理及影响因素分析[J]. *山东财经大学学报*, 2020, 32(2): 5-14. [Sun L W, Ren X W. Collaborative governance and influencing factors of carbon emission in Beijing-Tianjin-Hebei Region[J]. *Journal of Shandong University of Finance and Economics*, 2020, 32(2): 5-14.]
- [25] 狄乾斌, 吴佳璐, 张洁. 基于生物免疫学理论的海域生态承载力综合测度研究: 以辽宁省为例[J]. *资源科学*, 2013, 35(1): 21-29. [Di Q B, Wu J L, Zhang J. General measurement of marine ecological carrying capacity and biological immunology: A case study in Liaoning Province[J]. *Resources Science*, 2013, 35(1): 21-29.]
- [26] 陈小龙, 狄乾斌. 资源型城市生态转型绩效评价及发展对策研究: 以平顶山市为例[J]. *资源与产业*, 2021, 23(5): 1-10. [Chen X L, Di Q B. A case study on Pingdingshan City: Performance evaluation of and developing approaches to ecological transformation in resource-based cities[J]. *Resources & Industries*, 2021, 23(5): 1-10.]
- [27] 李虹, 张希源. 区域生态创新协同度及其影响因素研究[J]. *中国人口·资源与环境*, 2016, 26(6): 43-51. [Li H, Zhang X Y. Research on regional ecological innovation synergy and its influencing factors[J]. *China Population, Resources and Environment*, 2016, 26(6): 43-51.]
- [28] 鲁继通. 京津冀区域协同创新能力测度与评价: 基于复合系统协同度模型[J]. *科技管理研究*, 2015, 35(24): 165-170. [Lu J T. Measurement and evaluation of Beijing-Tianjin-Hebei regional collaborative innovation ability based on coordinating measurement model with respect to composite system[J]. *Science and Technology Management Research*, 2015, 35(24): 165-170.]
- [29] 孙才志, 郭可蒙, 邹玮. 中国区域海洋经济与海洋科技之间的协同与响应关系研究[J]. *资源科学*, 2017, 39(11): 2017-2029. [Sun C Z, Guo K M, Zou W. The coordination and response between regional marine economy and marine science and technology in China[J]. *Resources Science*, 2017, 39(11): 2017-2029.]
- [30] 高嵩, 王士君, 谭亮. 东北振兴以来吉林省区域经济差异的时空演变研究[J]. *地理科学*, 2017, 37(11): 1712-1719. [Gao H, Wang S J, Tan L. Regional economic disparities and spatio-temporal evolution in Jilin Province Since 2003[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2017, 37(11): 1712-1719.]
- [31] 汪侠, 徐晓红. 长江经济带经济高质量发展的时空演变与区域差距[J]. *经济地理*, 2020, 40(3): 5-15. [Wang X, Xu X H. Spatial-temporal evolution and regional disparity of economic high-quality development in the Yangtze River[J]. *Economic Geography*, 2020, 40(3): 5-15.]
- [32] 赵林, 曹乃刚, 韩增林, 等. 中国绿色经济效率空间关联网络演变特征及影响因素[J]. *资源科学*, 2021, 43(10): 1933-1946. [Zhao L, Cao N G, Han Z L. Spatial correlation network and influencing factors of green economic efficiency in China[J]. *Resources Science*, 2021, 43(10): 1933-1946.]
- [33] 徐维祥, 张凌燕, 刘程军, 等. 城市功能与区域创新耦合协调的空间联系研究: 以长江经济带107个城市为实证[J]. *地理科学*, 2017, 37(11): 1659-1667. [Xu W X, Zhang L Y, Liu C J, et al. The coupling coordination of urban function and regional innovation: A case study of 107 cities in the Yangtze River Economic Belt [J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2017, 37(11): 1659-1667.]

Regional differences and key pathway identification of the coordinated governance of pollution control and carbon emission reduction in the three major urban agglomerations of China under the “Double-Carbon” targets

DI Qianbin^{1,2}, CHEN Xiaolong¹, HOU Zhiwen²

(1. School of Geography, Liaoning Normal University, Dalian 116029, China; 2. Marine Economies and Sustainable Development Research Center, Liaoning Normal University, Dalian 116029, China)

Abstract: Urban agglomerations are the main carrier of regional economic and green development in China, and their strategic position is rapidly increasing. Under the targets of carbon neutralization and carbon peaking, research on coordinated governance of urban agglomeration pollution control and carbon emission reduction is an important content of exploring regional sustainable development. Based on the mechanism of change of coordinated governance of pollution control and carbon emission reduction, this study used the panel data of the three major urban agglomerations of China from 2010 to 2019 to measure the coordination degree of coordinated governance of pollution control and carbon emission reduction in these regions with correlation coefficient matrix method and composite system coordination degree model. Using Gini coefficient, coefficient of variation, Theil index and its decomposition method, and gravity model, this study analyzed the regional differences and spatial connection intensity of the coordinated governance of pollution control and carbon emission reduction and identified the critical pathways of pollution control and carbon emission reduction coordinated governance. The results show that: (1) The orderliness degree of coordinated governance in the three major urban agglomerations showed a significant growth trend; However, the coordination degree is low, and the system is in an unstable and uncoordinated state. (2) The differences in the coordination degree of coordinated governance of pollution control and carbon emission reduction in the Beijing-Tianjin-Hebei region gradually decreased, while the differences in the Yangtze River Delta remained stable, and the internal differences in the Pearl River Delta fluctuate greatly. (3) The network density and network structure complexity in the Beijing-Tianjin-Hebei region and the Pearl River Delta are higher than those in the Yangtze River Delta, and the spatial connection intensity is higher. The cities are interconnected and influenced by each other. The coordinated governance of pollution control and carbon emission reduction in the three major urban agglomerations can be promoted from the aspects of policy, technology, capacity building, top-level design, transformation and upgrading, and cooperation and expansion.

Key words: Dual-Carbon targets; urban agglomerations; pollution control and carbon emission reduction; coordinated governance; spatial connection; critical pathway identification; coordination degree model of composite system