

# 天津市产业碳排放的影响因素及贡献

江文渊<sup>1,2</sup>, 曾珍香<sup>1</sup>, 张征云<sup>2</sup>

(1. 河北工业大学 经济管理学院, 天津 300401; 2. 天津市环境保护科学研究院, 天津 300191)

**摘要:** [目的] 综合考虑“水—土—能—碳”相互关系, 研究产业碳排放的影响因素及贡献, 为天津市减排决策制定提供一定依据。[方法] 对天津市产业碳排放进行测算, 将水土资源因素引入 Kaya 恒等式, 运用 LMDI 模型计算产业碳排放各影响因素的贡献。[结果] 2004—2018 年天津市各产业碳排放均呈现上升趋势; 整体来看, 水资源经济产出、人口数量促进天津市各产业碳排放, 且前者为主要促进因素, 水土资源因素抑制各产业碳排放, 碳排放强度促进农业碳排放, 而抑制其他产业碳排放, 人均用地面积抑制农业碳排放, 而促进其他产业碳排放; 水土资源因素对各产业碳排放影响的变化与水土资源匹配度变化有较好的一致性, 单位用地面积用水量越多, 其对碳排放的促进作用越大。[结论] 为实现节能减排, 应发展节水产业, 优化城市水土资源开发利用, 发挥水土资源因素对碳排放的抑制作用。

**关键词:** 产业碳排放; 水土资源匹配度; LMDI 模型; 天津市

**文献标识码:** B

**文章编号:** 1000-288X(2020)05-0152-08

**中图分类号:** X24

**文献参数:** 江文渊, 曾珍香, 张征云. 天津市产业碳排放的影响因素及贡献[J]. 水土保持通报, 2020, 40(5): 152-159. DOI: 10. 13961/j. cnki. stbctb. 2020. 05. 023; Jiang Wenyu, Zeng Zhenxiang, Zhang Zhengyun. Impact factors and contribution of industrial carbon emissions of Tianjin City [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2020, 40(5): 152-159.

## Impact Factors and Contribution of Industrial Carbon Emissions of Tianjin City

Jiang Wenyu<sup>1,2</sup>, Zeng Zhenxiang<sup>1</sup>, Zhang Zhengyun<sup>2</sup>

(1. School of Economics and Management, Hebei University of Technology, Tianjin 300401, China; 2. Tianjin Academy of Environmental Sciences, Tianjin 300191, China)

**Abstract:** [Objective] Considering the interactions of water, land, energy, and carbon, the impact factors and contribution of industrial carbon emissions were studied to provide suggestions to Tianjin's emission reduction decision-making bodies. [Methods] The industrial carbon emissions of Tianjin City were calculated, and a logarithmic mean division index was used to calculate industrial carbon emissions by introducing water and land factor to the Kaya identity. [Results] From 2004 to 2018, all industrial carbon emissions of Tianjin City showed a staged upward trend. The economic output of industrial water resources and population promoted the industrial carbon emissions of Tianjin City, and the former was the main driving factor. Water and land factor had an inhibitory effect on industrial carbon emissions. Carbon emission intensity was a promoting factor for agricultural carbon emissions, while it was an inhibitory factor for other industrial carbon emissions. Land area per capita was an inhibitory factor for agricultural carbon emissions, while it was a promoting factor for other industrial carbon emissions. The changes in the impact of land and water resources on carbon emissions in various industries agreed well with the changes in the matching degree of water and land resources. The water consumption per unit land area increased, and the promotional effect of water and land resources on carbon emission became stronger. [Conclusion] To save energy and reduce

收稿日期: 2020-05-28

修回日期: 2020-07-13

资助项目: 生态环境部水体污染控制与治理科技重大专项“天津滨海工业带水污染控制与生态修复顶层设计方案和路线图研究”(2017ZX07107-001)

第一作者: 江文渊(1986—), 女(汉族), 湖北省武汉市人, 博士研究生, 高级工程师, 研究方向为水土资源管理、能源管理。Email: jiangwenyuan830@163.com。

通信作者: 曾珍香(1965—), 女(汉族), 湖南省益阳市人, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事能源信息学研究与教学工作。Email: xzeng@hebut.edu.cn。

emissions, water-saving industries should be developed, and urban water and soil development and utilization should be optimized to enable water and land resources to inhibit carbon emissions.

**Keywords:** industrial carbon emissions; matching degree of water and land; logarithmic mean divisia index (LMDI); Tianjin City

全球大气 CO<sub>2</sub> 浓度从 1750 年的 445.99 mg/m<sup>3</sup>, 增长至 2019 年的 807.67 mg/m<sup>3</sup>[1]。据《2019 全球碳预算报告》[2], 1959—2018 年间, 82% 的碳排放来源于化石燃料燃烧。全球 CO<sub>2</sub> 排放年均值从 20 世纪 60 年代的 3.0±0.2(10<sup>9</sup> t/a) 增长至近 10 a 间的 9.5±0.5(10<sup>9</sup> t/a)(以 C 计), 全球平均气温持续升高, 气候变暖形势不容乐观[3]。作为碳排放量居世界首位的国家[4], 中国政府多年来致力节能减排, 但实现 2030 年单位 GDP 碳排放量比 2005 年下降 60%~65%[5] 的目标仍面临压力。天津作为传统工业城市, 能源消耗增长, 减排压力大, 是中国《“十三五”节能减排综合工作方案》确定的重点减排区域之一[6], 同时也是碳排放权交易试点城市[7]。因此, 对天津碳排放问题开展研究, 能够为全市乃至京津冀区域低碳发展助力。

农业、工业、服务业等产业因其巨大的能源消费量, 贡献了主要的 CO<sub>2</sub> 排放量, 其中工业部门贡献最大[8], 其次为服务业、农业。要降低碳排放量, 则需要弄清碳排放的影响因素及贡献[9], 为今后有效开展减排工作提供基础。国内外学者采用不同方法开展了大量研究, Pao 等人[10] 用灰色预测模型基于 CO<sub>2</sub> 排放量、能源消费量、经济增长的关系对三者未来发展趋势进行了预测, Li 等[11] 利用 STIRPAT 模型对南京市 2000—2016 年碳排放进行了研究, 表明经济发展水平增长能够促进南京碳排放量增长, 能源使用强度降低则会抑制碳排放量增长, Chen 等[12] 的研究揭示了经济增长以及农业碳排放强度增加是引起农业碳排放增多的重要因素。近年来, 出现了将水土资源要素引入气候变化与能源消耗碳排放研究的新视角, 美国能源局[13] 聚焦“水—土—能”系统耦合与气候变化关系, 分析了该耦合系统在减缓气候变化中发挥的作用, Ringler 等[14] 认为应从“水—能—土—食物”耦合研究的视角着眼, 实现提高粮食产量与水、土、能等资源利用效率提升的双赢局面, Fang 等[15] 提出了“足迹家族”的构想, 将水资源、土地资源、能源和碳排放整合起来, Silalertruksa 等[16] 认为在开展农业温室气体排放评估时, 应考虑“土—水—能”系统关联, 研究不同土、水投入情况下的排放状况。Zhao 等[17] 的研究探究了多种因素对我国农业碳排放的影响, 重点

分析了水土资源利用对中国农业碳排放变化的双向作用, 王若梅等[18] 研究了水土资源匹配与农业碳排放的关系, 得出农业水土资源因素对长江经济带农业碳排放为抑制作用的结论。

经过系统阅读与梳理文献, 发现现有研究忽略了从水资源、土地资源、能源投入与碳排放耦合作用视角对区域碳排放的影响因素进行分析。近几年出现了少量相关研究也仅针对农业碳排放, 缺乏从其他产业视角开展的研究, 农业碳排放在整个产业碳排放中所占比例较小, 对其他产业进行研究更具有减排意义。因此, 本文以天津市为研究区域, 综合考虑“水—土—能—碳”多要素作用下的产业碳排放问题, 为促进天津市乃至京津冀低碳发展提供支持。

## 1 研究方法数据来源

### 1.1 产业活动“水—土—能—碳”分析框架

水资源和土地资源是区域发展的基础性资源[19], 任何产业活动都离不开水土资源的开发利用, 同时这些活动都需要投入能源, 相应产生碳排放。借鉴赵荣钦等[20] 的观点, 设计产业活动“水—土—能—碳”分析框架(见图 1)。产业活动主要包括农业生产活动、工业生产活动和服务业活动, 这些活动都需要水资源、土地资源及能源投入, 相应的产生碳排放。其中, 农业水资源利用过程中抽水、输水、灌溉过程需要使用农用水泵、农业喷灌设施, 农业土地资源利用中的土地平整、耕作、收割过程需要使用播种机、收割机、割捆机、脱粒机等设备, 消耗柴油、汽油、电力等能源; 工业水资源利用过程中取水、输水、用水、废水处理、排水等过程需要使用抽水泵、加压泵、热力设备、污水处理设施, 工业土地资源利用过程中的土地平整、厂房建设使用多种工程机械, 工业产品生产制造, 也需要投入大量燃料、电力、热力能源; 服务业水资源利用过程中的取水、输水、用水、排水等过程需要使用抽水泵、加压泵、热力设备, 服务业土地资源利用过程中的土地平整、房屋建设会使用多种工程机械, 服务提供同样消耗化石燃料、电力等能源, 这些“水—土—能”耦合作用下产生的碳排放最终都汇入大气碳库, 引起温室气体含量升高。

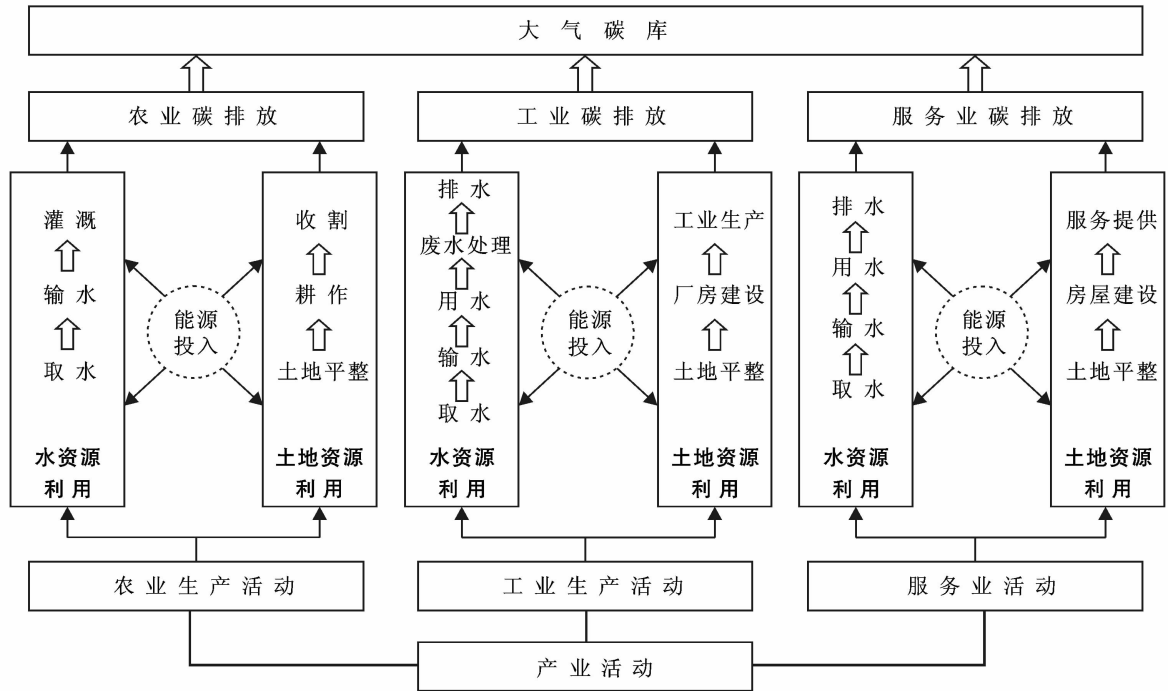


图 1 产业活动“水—土—能—碳”分析框架图

## 1.2 碳排放测算模型

根据农业、工业、服务业(含批发和零售业、住宿和餐饮业、交通运输、仓储和邮政业、其他服务业)终端能源消费量、能源燃烧发热值、碳含量、碳氧化率来测算产业碳排放量<sup>[21]</sup>,取值参考《中国能源统计年鉴》<sup>[22]</sup>及卢娜<sup>[23]</sup>的研究(见表 1)。能源消费选取原煤、洗精煤、其他洗煤、型煤、焦炭、焦炉煤气、其他煤气、其他焦化产品、原油、汽油、煤油、柴油、燃料油、液化石油气、炼厂干气、其他石油制品、天然气、热力和电力 19 个能源品种进行估算。其中,前 17 种化石燃料消费 CO<sub>2</sub> 排放量采用公式(1)核算,电力、热力消费 CO<sub>2</sub> 排放量采用公式(2)核算,电力 CO<sub>2</sub> 排放系数采用 2017 年中国区域电网基准线排放因子华北区域电网取值,为 96 800 t/10<sup>8</sup> kWh(以 CO<sub>2</sub> 计),热力 CO<sub>2</sub> 排放系数根据《中国能源统计年鉴》中热力折标煤系数估算,为 850.725 t/10<sup>13</sup> J(以 CO<sub>2</sub> 计),用(3)式计算所有能源消耗 CO<sub>2</sub> 排放总量:

$$C_f = \sum_{i=1}^{17} E_i \times \text{NCV}_i \times \delta_i \times \text{OR}_i \times \frac{44}{12} \quad (1)$$

$$C_{nf} = \sum_{j=1}^2 E_j \times \alpha_j \quad (2)$$

$$C = C_f + C_{nf} \quad (3)$$

式中:  $C_f$  指除电力、热力外的 17 种化石燃料消费 CO<sub>2</sub> 排放量(t);  $E_i$  指第  $i$  种能源终端消费量(10<sup>4</sup> t, 10<sup>8</sup> m<sup>3</sup>);  $\text{NCV}_i$  指第  $i$  种能源低位发热值(10<sup>12</sup> J/10<sup>4</sup> t, 10<sup>12</sup> J/10<sup>8</sup> m<sup>3</sup>);  $\delta_i$  指第  $i$  种能源含碳量(t/10<sup>12</sup> J)(以 C

计);  $\text{OR}_i$  指第  $i$  种能源燃烧氧化率;  $\frac{44}{12}$  为将 C 转换为 CO<sub>2</sub> 的转换系数;  $i=1, 2, \dots, 17$ , 指 17 种能源消费品种;  $C_{nf}$  为电力、热力能源终端消费 CO<sub>2</sub> 排放量(t);  $E_j$  为电力、热力终端消费量(10<sup>8</sup> kWh, 10<sup>13</sup> J);  $\alpha_j$  为电力、热力 CO<sub>2</sub> 排放系数,  $j=1, 2$ , 指电力、热力 2 个能源品种;  $C$  为 CO<sub>2</sub> 排放总量(10<sup>4</sup> t)。

表 1 能源发热值、含碳量及氧化率

能源类型	低位发热值	含碳量/ [t · (10 <sup>12</sup> J) <sup>-1</sup> ]	氧化率
原煤	209.08/[ (10 <sup>12</sup> J) · (10 <sup>4</sup> t) <sup>-1</sup> ]	25.8	0.98
洗精煤	263.44/[ (10 <sup>12</sup> J) · (10 <sup>4</sup> t) <sup>-1</sup> ]	25.8	0.98
其他洗煤	94.09/[ (10 <sup>12</sup> J) · (10 <sup>4</sup> t) <sup>-1</sup> ]	25.8	0.98
型煤	168/[ (10 <sup>12</sup> J) · (10 <sup>4</sup> t) <sup>-1</sup> ]	25.8	0.98
焦炭	284.35/[ (10 <sup>12</sup> J) · (10 <sup>4</sup> t) <sup>-1</sup> ]	29.2	0.98
焦炉煤气	1 735/[ (10 <sup>12</sup> J) · (10 <sup>8</sup> m <sup>3</sup> ) <sup>-1</sup> ]	12.1	0.995
其他煤气	1 827/[ (10 <sup>12</sup> J) · (10 <sup>8</sup> m <sup>3</sup> ) <sup>-1</sup> ]	12.1	0.995
其他焦化产品	282/[ (10 <sup>12</sup> J) · (10 <sup>4</sup> t) <sup>-1</sup> ]	29.2	0.98
原油	418.16/[ (10 <sup>12</sup> J) · (10 <sup>4</sup> t) <sup>-1</sup> ]	20.0	0.99
汽油	430.7/[ (10 <sup>12</sup> J) · (10 <sup>4</sup> t) <sup>-1</sup> ]	20.2	0.99
煤油	430.7/[ (10 <sup>12</sup> J) · (10 <sup>4</sup> t) <sup>-1</sup> ]	19.6	0.99
柴油	426.25/[ (10 <sup>12</sup> J) · (10 <sup>4</sup> t) <sup>-1</sup> ]	20.2	0.99
燃料油	418.16/[ (10 <sup>12</sup> J) · (10 <sup>4</sup> t) <sup>-1</sup> ]	21.1	0.99
液化石油气	501.79/[ (10 <sup>12</sup> J) · (10 <sup>4</sup> t) <sup>-1</sup> ]	17.2	0.995
炼厂干气	460.55/[ (10 <sup>12</sup> J) · (10 <sup>4</sup> t) <sup>-1</sup> ]	15.7	0.995
其他石油制品	401.9/[ (10 <sup>12</sup> J) · (10 <sup>4</sup> t) <sup>-1</sup> ]	20.0	0.99
天然气	3 893.1/[ (10 <sup>12</sup> J) · (10 <sup>8</sup> m <sup>3</sup> ) <sup>-1</sup> ]	15.3	0.995

### 1.3 水土资源匹配度模型

运用水土资源匹配度模型分析天津市各产业水土资源匹配状况,能够反映近 15 a 来全市产业水土资源分布状态,水土资源匹配度计算公式为:

$$W_i = \frac{W_i}{L_i} \quad (4)$$

式中: $W_i$  为产业水土资源匹配度( $10^8 \text{ m}^3/\text{km}^2$ );  $W_i$  为  $i$  种产业用水量( $10^8 \text{ m}^3$ );  $L_i$  为产业用地面积( $\text{km}^2$ ),  $i=1,2,3$ , 分别为农业、工业、服务业。

### 1.4 碳排放影响因素模型

采用 Kaya 恒等式构建碳排放影响因素模型,该恒等式由 Kaya 提出<sup>[24]</sup>,创造性地将碳排放量分解为人口数量、GDP、能源投入强度、碳排放强度四个因素的乘积。参考前人研究经验<sup>[17-18,25]</sup>,建立考虑水土资源因素的产业碳排放影响因素模型:

$$C = \frac{C}{G} \times \frac{G}{W} \times \frac{W}{L} \times \frac{L}{P} \times P \quad (5)$$

令  $i = \frac{C}{G}$ ,  $g = \frac{G}{W}$ ,  $w = \frac{W}{L}$ ,  $l = \frac{L}{P}$ , 则产业碳排放

$$\Delta C = C^T - C^0 = \Delta C_i + \Delta C_g + \Delta C_w + \Delta C_l + \Delta C_p + \Delta C_{rsd} \quad (7)$$

式中: $\Delta C_i = \frac{C^T - C^0}{\ln C^T - \ln C^0} \times \ln \frac{i^T}{i^0}$ ;  $\Delta C_g = \frac{C^T - C^0}{\ln C^T - \ln C^0} \times \ln \frac{g^T}{g^0}$ ;  $\Delta C_w = \frac{C^T - C^0}{\ln C^T - \ln C^0} \times \ln \frac{w^T}{w^0}$ ;

$$\Delta C_l = \frac{C^T - C^0}{\ln C^T - \ln C^0} \times \ln \frac{l^T}{l^0}; \Delta C_p = \frac{C^T - C^0}{\ln C^T - \ln C^0} \times \ln \frac{p^T}{p^0}; \Delta C_{rsd} = 0$$

$\Delta C$  表示从基期到  $T$  时期各产业碳排放总变化量;  $C^0$  表示基期产业碳排放量;  $C^T$  表示  $T$  时期产业碳排放量;  $\Delta C_i, \Delta C_g, \Delta C_w, \Delta C_l, \Delta C_p$  分别表示各产业碳排放强度、水资源利用的经济产出、水土资源匹配度、人均产业用地面积、人口数量对各产业碳排放量变化的贡献值,  $\Delta C_{rsd}$  表示分解因素后的残余项,单位均为  $10^4 \text{ t}$  (以  $\text{CO}_2$  计)。

$$\text{乘法分解形式为: } C^R = C^T / C^0 = C_i^R \times C_g^R \times C_w^R \times C_l^R \times C_p^R \quad (8)$$

式中: $C_i^R = \frac{\ln C^T - \ln C^0}{C^T - C^0} \times \Delta C_i$ ;  $C_g^R = \frac{\ln C^T - \ln C^0}{C^T - C^0} \times \Delta C_g$ ;

$$C_w^R = \frac{\ln C^T - \ln C^0}{C^T - C^0} \times \Delta C_w;$$

$$C_l^R = \frac{\ln C^T - \ln C^0}{C^T - C^0} \times \Delta C_l; C_p^R = \frac{\ln C^T - \ln C^0}{C^T - C^0} \times \Delta C_p$$

$C^R$  表示从基期到  $T$  时期的产业碳排放总变化率,  $C_i^R, C_g^R, C_w^R, C_l^R, C_p^R$  分别表示产业碳排放强度、水资源的经济产出、水土资源匹配度、人均产业用地面积、人口数量对各产业碳排放总变化量的贡献率。贡献率大于 1, 表明该因素对碳排放起加强作用, 小于 1 则为抑制作用, 越接近于 1 说明作用越小。

### 1.5 数据来源

选取天津市作为研究区域,以 2004—2018 年作为研究时段,计算产业碳排放量所需的各类产业活动能源终端消费量等数据来自历年《中国能源统计年鉴》<sup>[22]</sup>;水土资源匹配情况及产业碳排放影响因素计算时用到的农业、工业、服务业用水量来自历年《天津

量可视为 5 个因素的乘积:

$$C = i \times g \times w \times l \times p \quad (6)$$

式中: $C$  为各产业(农业、工业、服务业)碳排放总量( $10^4 \text{ tCO}_2$ );  $G$  为各产业增加值( $10^8$  元);  $W$  为各产业用水量( $10^8 \text{ m}^3$ );  $L$  为各产业用地面积( $\text{km}^2$ );  $P$  为人口数量( $10^4$  人);  $i$  为各产业碳排放强度;  $g$  为各产业水资源利用的经济产出;  $w$  为单位产业用地面积产业用水量,即各产业水土资源匹配度(水土资源因素);  $l$  为人均各产业用地面积;  $p$  为人口数量。

对数指标分解方法 LMDI 由 Ang 提出<sup>[26]</sup>,该方法相比其他方法具有分解完全、无残差等明显优势<sup>[27-28]</sup>。本研究将该方法与 Kaya 恒等式相结合,以测度不同影响因素对碳排放多年变化的贡献值及贡献率。LMDI 有加法与乘法两种分解形式,加法分解形式可计算不同影响因素对碳排放多年变化的贡献值,乘法分解形式可计算不同影响因素的贡献率,加法分解形式为:

$$(7)$$

市水资源公报》<sup>[29]</sup>,农用地、工业用地、服务业用地面积,农业、工业、服务业增加值、人口等来自历年《天津统计年鉴》<sup>[30]</sup>;其中增加值数据统一为 2004 年可比价,以消除多年价格影响。

## 2 结果与分析

### 2.1 天津市产业碳排放测算及时序变化

计算得出 2018 年天津市各产业碳排放量相比 2004 年均具有显著增加,其中农业碳排放量由 2004 年的  $1.68 \times 10^6 \text{ t}$  增长至 2018 年的  $2.80 \times 10^6 \text{ t}$ ,增长率为 66.50%,2017 年达到最高,为  $3.04 \times 10^6 \text{ t}$ ;工业碳排放量由 2004 年的  $6.23 \times 10^7 \text{ t}$  增长为 2018 年的  $1.41 \times 10^8 \text{ t}$ ,增长率为 126.77%,2014 年达到最高,为  $1.54 \times 10^8 \text{ t}$ ;服务业碳排放量由 2004 年的  $1.83 \times 10^7 \text{ t}$  增长至 2018 年的  $3.41 \times 10^7 \text{ t}$ ,为最高值,增长率为 86.97%。各产业碳排放量由大到小排序为:工业 > 服务业 > 农业(见图 2)。工业碳排放量在 2014

年前一直快速增长,说明天津市在此期间一直保持着经济高增长、高能耗、高排放的发展模式,产业结构偏重、煤炭等化石能源消费占比高是工业碳排放持续增长的重要原因。“十三五”以来,天津加快推进钢铁、水泥等重点行业淘汰落后产能和化解过剩产能,对接《中国制造 2025》,壮大发展航空航天、生物医药、新能源等高端产业,能源消费量和碳排放量逐渐下降。因节能减排工作重点集中在工业,农业、服务业碳排放量 15 a 来呈现波动上升趋势,是未来随着减排进一步深入应关注的领域。

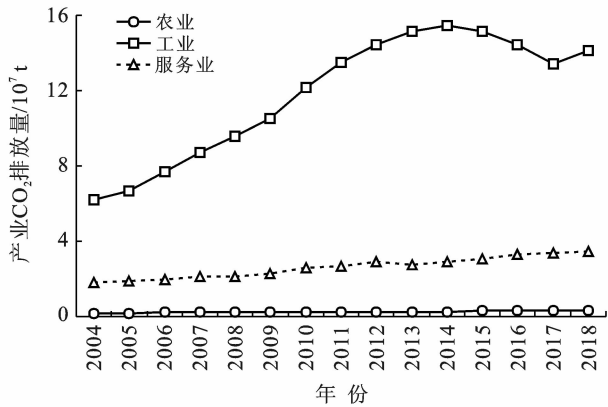


图 2 2004—2018 年天津市各产业 CO<sub>2</sub> 排放总量趋势

## 2.2 天津市水土资源匹配情况分析

计算全市 15 a 间各产业水土资源匹配度,得到如图 3 所示结果。整体来看,各产业水土资源匹配度均呈现下降趋势,其中,农业和服务业水土资源匹配度在研究期内里波动不大,分别从 2004 年的  $1.70 \times 10^5 \text{ m}^3/\text{km}^2$ ,  $3.70 \times 10^5 \text{ m}^3/\text{km}^2$  下降至 2018 年的  $1.50 \times 10^5 \text{ m}^3/\text{km}^2$ ,  $2.40 \times 10^5 \text{ m}^3/\text{km}^2$ 。其中农业水土资源匹配度最大值出现在 2007 年,为  $2.00 \times 10^5 \text{ m}^3/\text{km}^2$ ,最小值出现在 2018 年,为  $1.50 \times 10^5 \text{ m}^3/\text{km}^2$ ,说明近 10 a 来通过在全市因地制宜推广先进适用的节水灌溉技术,农业水资源利用效率逐步提升。服务业水土资源匹配度最大值出现在 2010 年为  $4.00 \times 10^5 \text{ m}^3/\text{km}^2$ ,最小值出现在 2015 年,为  $2.30 \times 10^5 \text{ m}^3/\text{km}^2$ ,说明近年来服务业水资源利用效率也逐步提高,人们节水意识逐渐增强。工业水土资源匹配度相比农业、服务业变幅较大,从 2004 年的  $4.41 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{km}^2$ ,下降至 2018 年的  $2.45 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{km}^2$ ,最大值出现在 2004 年,最小值出现在 2017 年,为  $2.27 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{km}^2$ 。工业用地面积相对于农业用地、服务业用地面积较小是工业水土资源匹配度显著高于其他两个产业匹配度的重要原因。同时,工业单位用地面积用水量多年来呈现显著下降趋势,说明随

着《工业和信息化部关于进一步加强工业节水工作的意见》《京津冀工业节水行动计划》等全国及地方工业节水措施的推进,天津市节水工业发展、节水技术推广,工业用水效率大幅提升。

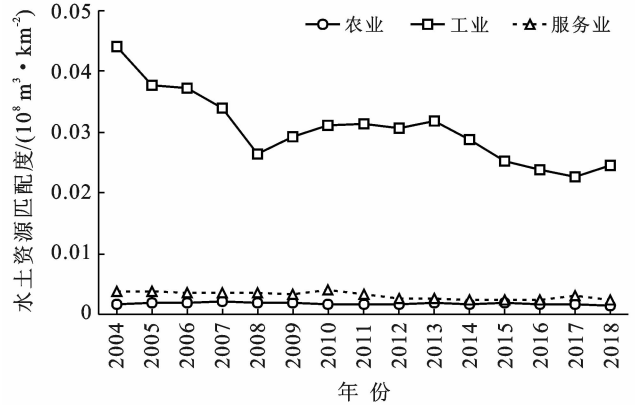


图 3 2004—2018 年天津市各产业水土资源匹配情况

## 2.3 天津市产业碳排放影响因素分析

对各产业碳排放量进行 Kaya 恒等式分解,计算各因素对各产业碳排放变化的贡献值(见表 2)及贡献率(见图 4)。各因素对各产业碳排放增长的贡献程度由大到小依次为:农业水资源经济产出>人口数量>农业碳排放强度>农业水土资源匹配度>人均农用地面积;工业水资源经济产出>人口数量>人均工业用地面积>工业水土资源匹配度>工业碳排放强度;服务业水资源经济产出>人口数量>人均服务业用地面积>服务业水土资源匹配度>服务业碳排放强度。

各影响因素对天津市不同产业碳排放的贡献不同。2004—2018 年,农业水资源经济产出、人口数量、农业碳排放强度贡献值绝大多数年份为正,15 a 来其对碳排放的整体贡献率均大于 1,分别为 1.819 6, 1.523 5, 1.114 5,对农业碳排放产生促进作用;农业水土资源匹配度、人均农用地面积的贡献值绝大多数年份为负,多年来其对碳排放的整体贡献率均小于 1,分别为 0.843 2, 0.639 1,对农业碳排放表现为抑制作用;工业水资源经济产出、人口数量、人均工业用地面积贡献值绝大多数年份为正,其对碳排放的贡献率均大于 1,分别为 5.492 5, 1.523 5, 1.270 3,对工业碳排放产生促进作用,工业水土资源匹配度、工业碳排放强度的贡献值绝大多数年份为负,其对碳排放的贡献率均小于 1,分别为 0.554 4, 0.384 8,对工业碳排放产生抑制作用;服务业影响因素贡献情况与工业相似,服务业水资源经济产出、人口数量、人均服务业用地面积贡献值为正,其对碳排放的贡献率均大于 1,分

别为 4.335 4,1.523 5,1.158 8,对服务业碳排放产生促进作用,服务业水土资源匹配度、服务业碳排放强度贡献值为负,其对碳排放的贡献率均小于 1,分别为 0.636 7,0.383 6,对农业碳排放产生抑制作用。

表 2 2004—2018 年天津市各产业碳排放变化及影响因素分解

年份	产业	碳排放贡献值/ $10^4$ t						
		$\Delta C$	$\Delta C_i$	$\Delta C_g$	$\Delta C_w$	$\Delta C_l$	$\Delta C_p$	
2004—2005	农 业	21.611 5	14.083 8	-14.568 8	22.241 3	-3.493 8	3.349 1	
2005—2006		10.099 0	3.572 9	8.804 2	-2.062 4	-6.110 3	5.894 6	
2006—2007		7.857 0	5.015 8	-3.646 6	8.667 3	-9.634 4	7.455 0	
2007—2008		-5.097 0	-11.364 0	19.078 9	-10.881 2	-12.874 0	10.943 2	
2008—2009		7.687 8	0.780 3	9.110 2	-10.780 8	-0.393 8	8.971 9	
2009—2010		19.238 8	12.086 3	41.134 2	-31.933 9	-14.438 5	12.390 7	
2010—2011		22.821 5	13.596 4	-3.355 3	14.462 9	-11.928 7	10.046 3	
2011—2012		18.885 1	11.148 3	10.103 1	-1.037 5	-12.418 9	11.090 0	
2012—2013		-9.434 4	-19.147 8	-6.696 0	18.254 9	-12.769 3	10.923 8	
2013—2014		4.737 9	-2.541 8	24.370 5	-16.958 7	-8.025 2	7.893 2	
2014—2015		13.651 8	6.635 0	-12.710 1	20.793 5	-6.450 2	5.383 7	
2015—2016		14.930 0	6.409 1	19.767 5	-9.636 2	-4.420 1	2.809 5	
2016—2017		8.202 8	-0.083 4	43.293 4	-34.058 9	0.060 0	-1.008 3	
2017—2018		-23.169 8	-23.445 7	20.567 6	-19.151 6	-1.651 5	0.511 4	
2004—2018		112.022 0	23.823 1	131.528 9	-37.471 4	-98.366 3	92.507 6	
2004—2005		工 业	462.3017	-622.115 8	1 839.806 9	-1 015.749 5	139.627 1	120.733 1
2005—2006			992.919 0	-84.189 2	1 205.484 4	-93.515 7	-251.619 7	216.759 2
2006—2007			988.274 0	-314.419 9	1 738.006 6	-760.688 5	27.081 0	298.294 8
2007—2008	887.166 4		-696.970 4	2 471.506 1	-2 297.374 5	925.011 4	484.993 8	
2008—2009	961.585 4		-740.677 7	372.914 1	1 022.075 9	-127.980 8	435.253 8	
2009—2010	1 611.0843		-534.525 6	962.394 4	699.524 6	-152.744 0	636.434 9	
2010—2011	1 381.3383		-900.096 3	1 812.829 7	153.287 2	-218.398 9	533.716 7	
2011—2012	954.269 1		-1 132.981 2	1 893.246	-288.356 7	-109.490 7	591.851 0	
2012—2013	675.785 7		-1 100.612 3	950.355 0	498.987 3	-278.897 8	605.953 5	
2013—2014	304.781 2		-1 166.550 5	1 494.978 8	-1 499.000 5	1 018.963 3	456.390 1	
2014—2015	-343.054 6		-1 701.073 7	1 422.226 2	-2 027.853 5	1 663.140 7	300.505 7	
2015—2016	-655.462 7		-1 860.586 3	704.244 0	-819.500 8	1 176.227 8	144.152 6	
2016—2017	-1 005.884 8		-1 322.876 7	354.882 8	-701.216 9	710.246 3	-46.920 3	
2017—2018	676.940 1		323.386 5	529.691 6	1 015.949 1	-1 216.222 9	24.135 9	
2004—2018	7 892.043 1		-9 205.814 6	16 418.904 4	-5 685.914 8	2 306.515 7	4 058.352 3	
2004—2005	服 务 业		49.708 8	-163.380 1	180.033 3	-7.825 6	6.253 4	34.627 8
2005—2006			81.042 9	-164.991 6	229.151 0	-76.495 7	35.470 5	57.908 6
2006—2007			126.290 6	-155.999 2	96.257 3	20.267 3	91.983 1	73.782 2
2007—2008		11.022 7	-286.300 0	152.091 7	-2.788 4	36.756 9	111.262 6	
2008—2009		192.027 9	-117.721 7	427.195 2	-109.510 1	-102.934 4	94.998 8	
2009—2010		272.792 3	-48.577 6	-97.557 9	424.751 7	-142.086 0	136.262 2	
2010—2011		135.458 8	-227.022 8	676.173 7	-608.643 0	185.501 5	109.449 4	
2011—2012		239.605 8	-94.224 4	842.799 1	-533.091 7	-94.941 2	119.064 0	
2012—2013		-208.938 1	-559.351 3	224.020 8	5.684 7	4.898 5	115.809 2	
2013—2014		141.836 9	-137.325 7	460.658 1	-291.277 5	26.346 3	83.435 7	
2014—2015		193.837 2	-80.480 6	203.778 7	-123.635 7	135.874 7	58.300 1	
2015—2016		210.395 8	-91.255 2	-64.675 0	46.730 2	288.709 5	30.886 4	
2016—2017		125.531 6	-68.722 0	-651.442 7	854.590 5	2.328 9	-11.223 1	
2017—2018		17.711 5	-177.496 6	1092.038 1	-842.375 0	-60.421 9	5.966 9	
2004—2018		1 588.324 6	-2 431.730 2	3 723.030 3	-1 145.687 8	374.043 3	1 068.669 1	

水资源经济产出、人口数量对天津市各产业碳排放均产生促进作用。其中,水资源经济产出是促进各产业碳排放的主要因素。各产业单位用水量的经济产出越多,则产业规模会有扩大趋势,相应的水资源、

能源投入增加,导致碳排放量增加。15 a 来该因素对农业、工业、服务业碳排放贡献值均明显高于其他因素,贡献率分别为 1.819 6,5.492 5,4.335 4,可见工业、服务业水资源经济产出对碳排放产生强烈促进作用,农业方面促进作用稍弱。从各年贡献值来看,农业、工业、服务业分别有 8,9,11 个变化年的碳排放量增长主要由水资源经济产出贡献,农业、服务业分别有 5 个和 3 个变化年贡献值为负,工业则各年贡献值均为正,说明工业、服务业水资源投入的经济产出无论是对产业自身还是全市碳排放均贡献巨大,减少工业、服务业水资源经济产出对碳排放的促进作用具有更明显的减排意义。人口数量对各产业整体贡献率为 1.523 5,表现为促进作用。伴随人口增长和经济发展,基于现有能源消费方式,则需要更多的能源消耗以进行水土资源开发,支撑人口增长,产生更多碳排放。

水土资源匹配度,即水土资源因素对各产业碳排放均产生抑制作用。2004—2018 年,其对各产业碳排放的整体贡献率分别为 0.843 2,0.554 4,0.636 7,说明其对各产业抑制作用由大到小排序为:工业>服务业>农业。从各年的变化来看,水土资源因素对产业碳排放不是仅表现为单一方向作用,各产业均有 5 个变化年呈现为促进作用,其余变化年呈现抑制作用,说明水土资源因素对天津市各产业碳排放的影响呈现双向作用。由图 3 和表 2 可知,水土资源因素对各产业碳排放的影响的变化与水土资源匹配度变化有较好的一致性,水土资源匹配度越高,即单位用地面积用水量越多,水土资源因素对碳排放的促进作用越大。因为天津市属于北方缺水城市,据统计 2018 年全市人均水资源占有量仅为全国水平的 5.7%,引滦入津、南水北调等工程极大缓解了天津市用水紧张情况,但引水、输水过程也使水资源利用能源消耗上升,相应的碳排放量也会增加。

碳排放强度因素促进农业碳排放而抑制工业、服务业碳排放。2004—2018 年,该因素对农业、工业、服务业碳排放的整体贡献率分别为 1.114 5,0.384 8,0.383 6。说明多年来天津市农业碳排放增速整体高于农业经济发展增速,促进农业碳排放增长,仅在个别年份抑制农业碳排放增长。工业、服务业碳排放增速整体低于经济发展增速,抑制工业、服务业碳排放增长,说明这两个产业的节能减排效果较明显。

人均用地面积抑制农业碳排放而促进工业、服务业碳排放。2004—2018 年,该因素对农业、工业、服务业碳排放的整体贡献率分别为 0.639 1,1.270 3,1.158 8。15 a 间,伴随城市化进程的推进,天津人均农业用地面积减少,人均工业、服务业用地面积增加,农业能源

需求降低,工业、服务业能源需求增长,对农业碳排放产生抑制,对工业、服务业碳排放产生促进作用。

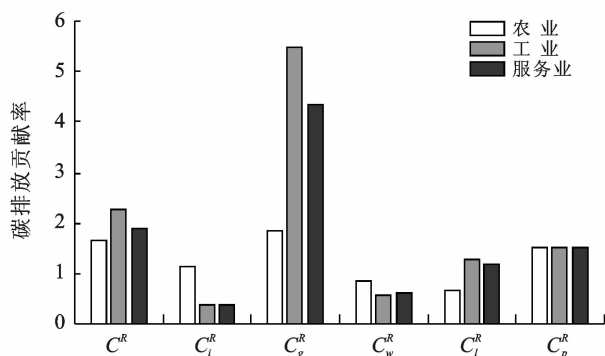


图 4 2004—2018 年天津市各影响因素碳排放贡献率

### 3 结论与建议

#### 3.1 结论

综合考虑水—土—能—碳的相互关系,对天津市产业碳排放进行测算,将水土资源因素引入 Kaya 恒等式,运用 LMDI 模型计算产业碳排放各影响因素的贡献,结果发现:

(1) 2004—2018 年天津市各产业碳排放均呈现上升趋势,农业、工业、服务业增长率分别为 66.50%, 126.77%, 86.97%。

(2) 整体来看,水资源经济产出、人口数量促进天津市各产业碳排放,其中前者为主要促进因素;水土资源因素抑制各产业碳排放;碳排放强度促进农业碳排放,而抑制其他产业碳排放;人均用地面积抑制农业碳排放,而促进其他产业碳排放。

(3) 水土资源因素对各产业碳排放影响的变化与水土资源匹配度变化有较好的一致性,单位用地面积用水量越多,其对碳排放的促进作用越大。

#### 3.2 建议

(1) 天津属于缺水城市,应发展节水产业、节水技术,减少高耗水农业、工业及服务业比重,注重土地资源集约利用,优化城市水土开发利用,重视水土资源匹配,发挥水土资源因素对碳排放的抑制作用,实现低碳绿色发展路径。

(2) 针对水资源的经济产出因素,一方面需优化产业用水效率,特别是提高工业用水与服务业用水的经济产出效率和质量,另一方面应降低水资源密集型产业的比重,减少水资源的经济产出对碳排放的促进作用。

(3) 针对碳排放强度因素,应大力实施节能减排措施,特别是农业节能减排,例如可鼓励农业节能机械研制并推广使用、实施节能降耗的耕作方式、大力

发展节能养殖模式等,减少单位增加值碳排放,减少该因素对产业碳排放的促进作用,增强抑制作用。

(4) 针对人口因素和人均用地面积因素,要合理引导城市人口增长和流动,缓解人口增长带来的水和土地资源紧张,同时适当控制农业用地面积减少和工业、服务业用地迅速扩张,减少对产业碳排放的促进作用。

#### [参 考 文 献]

- [1] National Oceanic & Atmospheric Administration, Earth System Research Laboratory (NOAA/ESRL), U. S. Department of Commerce. Trends in atmospheric carbon dioxide [EB/OL] (2020-04-06) [2020-04-20]. <http://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/global.html>.
- [2] Friedlingstein P, Jones M W, Osullivan M, et al. Global carbon budget 2019 [J]. *Earth System Science Data*, 2019, 11(4):1783-1838.
- [3] 王秋贤,王登杰,颜晓妹,等. 基于脱钩理论的烟台市碳排放效应分析[J]. *水土保持通报*, 2015, 35(2):313-318.
- [4] 周迪,王雪芹. 中国碳排放效率与产业结构升级的耦合度及耦合路径[J]. *自然资源学报*, 2019, 34(11):2305-2316.
- [5] 田云,张银岭. 中国农业碳排放减排成效评估、目标重构与路径优化研究[J]. *干旱区资源与环境*, 2019, 33(12):1-7.
- [6] 国务院. “十三五”节能减排综合工作方案[EB/OL] (2017-01-05) [2020-03-22]. [http://www.gov.cn/zhengce/content/2017-01/05/content\\_5156789.htm](http://www.gov.cn/zhengce/content/2017-01/05/content_5156789.htm).
- [7] 刘承智,潘爱玲,谢涤宇. 我国碳排放权交易市场价格波动问题探讨[J]. *价格理论与实践*, 2014(8):55-57.
- [8] 中国中长期低碳发展战略目标与实现路径研究[M]. 北京:中国环境出版集团, 2019.
- [9] 秦军,唐慕尧. 基于 Kaya 恒等式的江苏省碳排放影响因素研究[J]. *生态经济*, 2014(11):53-56.
- [10] Pao H, Fu H, Tseng C. Forecasting of CO<sub>2</sub> emissions, energy consumption and economic growth in China using an improved grey model [J]. *Energy*, 2012, 40(1):400-409.
- [11] Li Kongqing, Lu Ran, Chu Ruiwen, et al. Trends and driving forces of carbon emissions from energy consumption: A case study of Nanjing, China [J]. *Sustainability*, 2018, 10(12):4348.
- [12] Chen Jiandong, Cheng Shulei, Song Malin. Changes in energy-related carbon dioxide emissions of the agricultural sector in China from 2005 to 2013 [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2018, 94:748-761.
- [13] Skaggs R, Janetos T C. Climate and energy-water-land system interactions [R]. US: US Department of Energy, 2012.
- [14] Ringler C, Bhaduri A, Lawford R. The nexus across water, energy, land and food (WELF): Potential for improved resource use efficiency? [J]. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 2013, 5(6):617-624.
- [15] Fang Kai, Heijungs R, de Snoo G R. Theoretical exploration for the combination of the ecological, energy, carbon, and water footprints: Overview of a footprint family [J]. *Ecological Indicators*, 2014, 36:508-518.
- [16] Silalertruksa T, Gheewala S H. Land-water-energy nexus of sugarcane production in Thailand [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 182:521-528.
- [17] Zhao Rongqin, Liu Ying, Tian Mengmeng, et al. Impacts of water and land resources exploitation on agricultural carbon emissions: The water-land-energy-carbon nexus [J]. *Land Use Policy*, 2018, 72:480-492.
- [18] 王若梅,马海良,王锦. 基于水—土要素匹配视角的农业碳排放时空分异及影响因素:以长江经济带为例[J]. *资源科学*, 2019, 41(8):1450-1461.
- [19] 游珍,杨艳昭. 中国主要城市群水土资源条件与限制研究:以京津冀、长三角、珠三角为例[J]. *地域研究与开发*, 2018, 37(4):138-143.
- [20] 赵荣钦,李志萍,韩宇平,等. 区域“水—土—能—碳”耦合作用机制分析[J]. *地理学报*, 2016, 71(9):1613-1628.
- [21] Eggleston S, Buendia L, Miwa K, et al. 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories [R]. Japan: Institute for Global Environmental Strategies, 2006.
- [22] 中华人民共和国国家统计局. 中国能源统计年鉴[M]. 北京:中国统计出版社, 2005-2019.
- [23] 卢娜. 土地利用变化碳排放效应研究[D]. 南京:南京农业大学, 2011.
- [24] Kaya Y. Impact of carbon dioxide emission control on GNP growth: Interpretation of proposed scenarios [R]. Paris: Intergovernmental Panel on Climate Change, Response Strategies Working Group, 1989.
- [25] 魏玮,文长存,崔琦,等. 农业技术进步对农业能源使用与碳排放的影响:基于 GTAP-E 模型分析[J]. *农业技术经济*, 2018(2):30-40.
- [26] Ang B, Zhang F, Choi K. Factorizing changes in energy and environmental indicators through decomposition [J]. *Energy*, 1998, 23(6):489-495.
- [27] 戴小文,何艳秋,钟秋波. 中国农业能源消耗碳排放变化驱动因素及其贡献研究:基于 Kaya 恒等扩展与 LMDI 指数分解方法[J]. *中国生态农业学报*, 2015, 23(11):1445-1454.
- [28] 郑颖,逯非,刘晶茹,等. 我国典型城市化石能源消费 CO<sub>2</sub> 排放及其影响因素比较研究[J]. *生态学报*, 2020, 40(10):3315-3327.
- [29] 天津市水资源公报[R]. 天津:天津市水务局, 2004-2018.
- [30] 天津市统计局,国家统计局天津调查总队. 天津统计年鉴[M]. 北京:中国统计出版社, 2012.