

碳排放监测预警体系研究

——基于中国省级相关数据的分析

韩少秀¹ 朱美峰² 刘慧洁² 宋迎昌³¹

(1. 北京师范大学 教育学部, 北京 100875;

2. 中北大学 经济与管理学院, 山西 太原 030051;

3. 中国社会科学院生态文明研究所, 北京 100710)

【摘要】: 为深入贯彻落实习近平生态文明思想, 确保实现碳达峰、碳中和目标, 有必要准确识别碳排放风险因子。论文利用 2004—2018 年中国各省份相关数据, 从能源消费、产业结构和技术进步角度构建了碳排放分项预警和综合预警评价指标体系, 并测算了碳排放综合及分项预警指标值。结果表明: 我国碳排放预警指数整体上处于缓慢上升趋势, 即整体上我国碳排放风险正在逐步减小, 但不同区域之间的碳排放风险存在差异。其中, 能源消费分项预警指数对碳排放综合预警指数的影响最小且随时间呈现进一步下降趋势, 产业结构分项预警指数对碳排放综合预警指数的影响呈现下降趋势, 技术进步分项预警指数对碳排放综合预警指数的影响最大。最后提出加快技术升级、扩大造林面积、提升高新技术产业规模、推广节能技术、提高低碳零碳能源消费比例等降低碳排放风险的途径。

【关键词】: 碳排放 指标体系 监测预警

【中图分类号】: F062.2 **【文献标识码】:** A **【文章编号】:** 1671-4407(2022)07-021-07

2015 年中国在《巴黎气候协定》中承诺于 2030 年左右达到碳排放峰值, 并提出单位国内生产总值二氧化碳排放比 2005 年下降 60%~65% 的目标。随着中国经济的持续增长, 碳减排的压力逐步增大, 2019 年中国碳排放占全球总量的 28%, 人均排放量比世界平均水平高 46%。2020 年国家《“十四五”规划纲要》中明确提出要“制定 2030 年前碳达峰行动方案, 努力争取 2060 年前实现碳中和”^[1]。深入贯彻落实习近平生态文明思想, 实现碳达峰、碳中和目标是我国经济社会实现高质量发展的必然要求, 势必引起对经济社会系统的一场大变革。在碳中和目标下, 碳减排和约束对未来企业以及经济的转型发展带来了不容忽视的风险。因此, 在低碳发展已经成为我国各级政府经济发展的必然选择的背景下, 构建有效的碳排放预警体系对识别、监测碳排放风险因素具有积极意义, 能够为各级政府在提前部署低碳发展产业体系、制定能源行业转型发展等相关政策时提供决策依据, 从而保障低碳发展背景下经济的高质量转型发展, 顺利实现 2030 年碳达峰和 2060 年碳中和目标。

从当前文献来看, 目前对碳排放监测预警的研究文献较少。在预警指标体系研究方面, 丛日杰和韩洁平^[2]以火电厂为研究对

作者简介: 韩少秀, 博士, 助理研究员, 北京师范大学博士后, 研究方向为低碳经济、生态文明。E-mail: 956420976@qq.com
基金项目: 山西省软科学基金资助项目“能源革命背景下山西省新动能培育与新旧动能转换对策研究”(2019041012-4); 国家社会科学基金青年项目“韧性视域下生态优先和绿色发展的协同路径研究”(20CJY013)

象，基于 PSR 理论，从燃料消耗情况、污染物排放情况、低碳技术水平、电厂设备、环境保护水平等六个方面考虑，建立了预警体系。赵桂芹^[3]基于出口贸易增长率、出口贸易碳排放增长率、能源消费弹性系数、出口贸易依存度以及出口消费指数构建了对外贸行业碳排放预警监测指标体系。周志方和肖恬^[4]从重污染工业企业的能源投入阶段、能源消耗阶段以及产出阶段考虑，构建了包括节能减排技术指标、能源结构、能源效率、碳交易风险指标、政策管制指标、低碳产品竞争力等 18 个指标的碳风险预警体系。崔金栋等^[5]利用自由分类法和本体建模技术，从低碳网站搜索高索引的低碳评价指标构建可更新的碳排放预警指标体系。通过总结发现，现有对碳排放预警的相关研究主要以企业和行业为研究对象展开，无法从系统的视角对我国各省份碳排放风险状况予以监测和揭示。而宏观地了解和识别碳排放风险因素，并对地方经济发展中的碳排放情况进行客观评价，是各级地方政府提前部署低碳经济产业布局、制定低碳发展相关政策的前提。因此，构建多维监测预警指标体系，对碳排放风险进行量化研究具有重要的现实意义。

本文在已有文献研究基础上，将碳排放监测预警界定为对导致经济社会碳排放总量发生变化的核心风险要素变化情况的监测，并根据监测结果对各省份的碳排放风险状态进行评价。通过建立多维度碳排放监测预警指标体系，采用警戒阈值方法，对我国各省份碳排放风险状况进行监测，进一步从能源消费、产业结构和技术进步的角度设置先行指标对碳排放进行分项预警分析，以期识别各区域碳排放风险因素、提升区域低碳发展提供切实可行的方法和政策建议。

1 研究方法数据来源

1.1 碳排放预警体系指标体系构建

从系统视角构建碳排放监测预警指标体系需要从宏观和中观层面有效识别影响碳排放的先行指标。碳排放主要来自化石能源燃烧，因此，能源消费结构及强度等均会对碳排放产生显著影响^[6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13]，而产业结构优化^[14, 15, 16, 17, 18, 19]和技术进步^[20, 21, 22, 23, 24, 25]等则会对碳排放产生明显的抑制作用。因此，在科学性、可操作性以及可持续性原则下，基于碳排放主要来源确定预警指标，从能源消费角度构建了能源消费结构、能源消费规模、能源利用效率、能源依赖程度四个方面的分项预警指标；从产业结构角度主要考虑了整体的产业结构优化程度(包括产业结构合理化和产业结构高级化)和分项的产业结构碳排放规模(包括能源产业结构、工业能源消耗强度、农业碳排放规模、林业规模以及高新技术产业规模)；从技术进步的角度主要考虑了规模以上工业企业技术改造水平。预警指标分为两类，对碳排放具有抑制作用的指标为正向指标，而增加碳排放总量或强度的指标为负向指标。综合上述考虑，最终构建碳排放监测预警具体指标体系如表 1 所示。

表 1 碳排放监测预警指标体系

综合预警指标	分项预警指标	基础指标	具体指标	指标代码	影响方向
碳排放综合预警指标	能源消费分项预警指标	能源消费结构	煤炭消费占比/%	D ₁	负向
			石油消费占比/%	D ₂	负向
			天然气消费占比/%	D ₃	负向
		能源消费规模	化石能源消费总量/万吨标准煤	D ₄	负向
			天然气消费总量/亿立方米	D ₅	负向
		能源利用效率	单位 GDP 的能源消耗量/(吨/万元)	D ₆	负向
			能源加工转换效率/%	D ₇	正向

		能源依赖程度	能源对 GDP 的贡献率/%	D ₈	负向
			能源生产弹性系数/%	D ₉	负向
			电力生产弹性系数/%	D ₁₀	正向
			能源消耗弹性系数/%	D ₁₁	负向
			电力消费弹性系数/%	D ₁₂	正向
	产业结构分项预警指标	产业结构优化	产业结构合理化：泰尔指数	D ₁₃	负向
			产业结构高级化：第三产业产值/第二产业产值	D ₁₄	正向
		能源产业结构	原煤生产量占比/%	D ₁₅	负向
			原油生产量占比/%	D ₁₆	负向
			天然气生产量占比/%	D ₁₇	负向
			其他低碳及零碳能源占比/%	D ₁₈	正向
		工业碳排放规模	单位工业增加值能耗/(吨/万元)	D ₁₉	负向
		农业碳排放规模	农药使用量/万吨	D ₂₀	负向
			农业机械总动力/万千瓦	D ₂₁	负向
			单位面积农业机械动力/(万千瓦/千公顷)	D ₂₂	负向
		林业碳吸收规模	森林蓄积量/万立方米	D ₂₃	正向
			人均城市绿地面积/(平方米/人)	D ₂₄	正向
			人均公园绿地面积/(平方米/人)	D ₂₅	正向
		高新技术产业规模	计算机、通信和其他电子设备制造业产值/亿元	D ₂₆	正向
	技术进步分项预警指标	技术引进	规上工业企业引进技术经费支出/万元	D ₂₇	正向
		技术购买	规上工业企业购买境内技术经费支出/万元	D ₂₈	正向
		技术改造	规上工业企业技术改造经费支出/万元	D ₂₉	正向

1.2 碳排放警情分析方法

碳排放警情分析是确定碳排放警限阈值分级标准，根据预警指标体系对各省份碳排放警情现状予以判断分析的过程。

1.2.1 指标标准化

不同原始指标的量纲不同，不具有可比性，因此，本文对其进行了标准化处理，标准化过程如式(1)、式(2)所示。标准化后的指标取值在[0, 1]之间。

正项指标的处理方法为：

$$x^* = \frac{x_i - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}} \quad (1)$$

逆项指标的处理方法为：

$$x^* = \frac{x_{\max} - x_i}{x_{\max} - x_{\min}} \quad (2)$$

式中： x^* 为标准化后的指标值， x_i 为原始指标值(i 为某时间截面第 i 省份)， $x_{\min}$ 、 $x_{\max}$ 为某年份原始指标截面最小值和最大值。

1.2.2 熵权法权重设定

指标体系中综合指标的计算采用熵权法客观赋权重。据系统论的基本原理，熵是系统无序程度的一个度量，根据各指标的变异程度，利用信息熵计算出各指标的熵权，对各指标的权重进行修正。系统处于某种状态的概率假定为 p_i ($i=1, 2, \dots, m$)，则该系统的熵可用式(3)表示为：

$$e = -\sum_{i=1}^m p_i \cdot \ln p_i \quad (3)$$

当 $p_i=1/m$ ($i=1, 2, \dots, m$) 时，各种状态出现概率相等，此时熵取得最大值，即：

$$e_{\max} = \ln m \quad (4)$$

若待评样本有 m 个，评价指标有 n 个，原始评价矩阵为 $R=(r_{ij})_{m \times n}$ 。评价指标 r_j 的信息熵为：

$$e_j = -\frac{1}{\ln m} \cdot \sum_{i=1}^m p_{ij} \cdot \ln p_{ij} \quad (5)$$

式中：

$$p_{ij} = r_{ij} / \sum_{i=1}^m r_{ij}$$

据熵权法赋权重的原理，若某指标熵值越小，则该指标变异程度会越大，提供的信息量越大，在综合评价体系中，该指标起的作用就越大，相应地，其权重就应该越大。反之，其权重越小。第 j 个指标的熵权为：

$$w_j = (1 - e_j) / \sum_{j=1}^n (1 - e_j) \quad (6)$$

1.2.3 警限阈值确定方法

碳排放警情体系建立的目的是提供各省份碳排放预警测量，根据预警指数分析与评价警情并作出警报预测，因此必须确定警限阈值以及预警区间的设定标准。本文采用 3σ 原则确定预警区间， 3σ 原则基于正态分布原理， σ 为标准差。由于经济系统中指标值偏离均值的幅度均保持在较小区间，因此将大于 1 倍 σ 的区间处理为数据异常区间。每一年的警限阈值采用当年的截面数据予以确定，故预警区间处于一定程度的动态状态，保持了碳排放监测预警的客观性。预警等级采用五级分类，详见表 2。

表 2 警限阈值分类

预警状态	风险极大	风险较大	风险一般	风险较小	安全
区间	$(-\infty, \mu - \sigma)$	$[\mu - \sigma, \mu - 0.5\sigma)$	$[\mu - 0.5\sigma, \mu + 0.5\sigma)$	$[\mu + 0.5\sigma, \mu + \sigma)$	$[\mu + \sigma, +\infty)$
预警等级	红色	橙色	黄色	蓝色	绿色

注： μ 为均值， σ 为标准差。

1.2.4 警情计算

警情计算是对碳排放预警指数的计算与警情等级判定，即对指标体系各指标客观赋权后，分角度计算其加权平均数，得出分项预警指数和综合预警指数，并根据警限阈值标准判定其警情等级。计算过程如式 (7)~(10) 所示。

$$I_{EC} = \sum_{j=1}^{12} w_j \times X_{ij} \quad (7)$$

$$I_{IS} = \sum_{j=13}^{26} w_j \times X_{ij} \quad (8)$$

$$I_{TE} = \sum_{j=27}^{29} w_j \times X_{ij} \quad (9)$$

$$I = W_{EC} I_{EC} + W_{IS} I_{IS} + W_{TE} I_{TE} \quad (10)$$

式中： w_j 是第 j 个指标的综合权重， W_{EC} 是能源消费分项预警指标的权重， I_{EC} 是能源消费监测预警指数， W_{IS} 是产业结构分项预警指标的权重， I_{IS} 为产业结构监测预警指数， W_{TE} 是技术进步分项预警指标的权重， I_{TE} 为技术进步监测预警指数， I 为碳排放监测预警综合指数。 X_{ij} 为 i 年第 j 指标的标准化数据。

综合预警指数和分项预警指数均处于 $[0, 1]$ 之间，数值越趋于 0，表示研究区域的碳排放警情状况越严重；数值越大，表明碳排放警情越不明显。

每一年各区域的指标均存在一定的波动，指标权重以及分项和综合预警指标的数值均处于动态变化中，因此，预警区间是一个动态区间。结合 2018 年各区域指标具体取值，预警区间分类如表 3 所示。

表 3 碳排放等级分类表

综合预警指数	能源消费预警指数	产业结构预警指数	技术进步预警指数	预警状态	预警等级
(0, 0.01)	(0, 0.33)	(0, 0.11)	(0, 0.001)	风险极大	红色
[0.01, 0.11)	[0.33, 0.39)	[0.11, 0.17)	[0.001, 0.02)	风险较大	橙色
[0.11, 0.29)	[0.39, 0.52)	[0.17, 0.30)	[0.02, 0.22)	风险一般	黄色
[0.29, 0.38)	[0.52, 0.59)	[0.30, 0.36)	[0.22, 0.32)	风险较小	蓝色
[0.38, +∞)	[0.59, +∞)	[0.36, +∞)	[0.32, +∞)	安全	绿色

1.3 数据来源

数据来源于国家统计局 2004—2018 年的《中国统计年鉴》《科技统计年鉴》以及各省份 2004—2018 年的统计年鉴。

2 结果与分析

2.1 综合碳排放监测预警指数分析

综合碳排放监测预警指数由能源消费、产业结构和技术进步三部分构成。2004—2018 年，碳排放监测预警指数综合值显示，我国碳排放预警指数均值总体上处于上升趋势。如表 4 所示，2018 年处于绿色、蓝色、黄色、橙色、红色预警区间的省份数量分别为 4、2、15、9、0 个，2015 年分别为 4、4、11、10、1 个，2010 年分别为 4、4、10、9、3 个。整体来看，处于红色预警区间的省份数量区域逐步减少，但橙色预警区间的省份数量仍较多，碳排放的风险因素依然不容忽视。2018 年碳排放预警指数处于 0.04~0.95 之间，各省份之间的差异仍较明显，但综合指数处于红色警戒区域的省份数量首次下降为 0。从时间角度看，广东、北京、上海、浙江、江苏在各年份基本均处于碳排放预警指数的安全或者低风险区间，特别是广东，三个分项预警指数基本均处于全国前列，且 2016 年以来，与全国其他区域的差距显著拉大；而山西、河北、贵州、甘肃等省份大部分年份均处于高风险区间。

表 4 2018 年中国碳排放监测预警指数等级分布表

预警等级	综合预警指数	省份个数	省份名称
红色	(0, 0.01)	0	—
橙色	[0.01, 0.11)	9	河北、山西、河南、湖南、贵州、内蒙古、宁夏、甘肃、新疆
黄色	[0.11, 0.29)	15	天津、山东、安徽、陕西、湖北、重庆、江西、福建、广西、云南、青海、海南、吉林、辽宁、黑龙江
蓝色	[0.29, 0.38)	2	江苏、浙江
绿色	[0.38, +∞)	4	北京、上海、广东、四川

对 3 个分项预警指标进一步分析发现，2004—2018 年能源消费、产业结构和技术进步对碳排放预警监测指数的平均影响权

重分别为 0.231、0.292、0.477，表明技术进步对预警监测指数的平均影响最大，是导致全国各区域碳排放水平风险差异的主要影响因素；3 项权重的标准差分别为 0.059、0.048、0.076，即从全国层面看，低碳技术水平的提升一直是我国降低碳排放风险的重要环节，2004—2018 年，技术进步水平整体上发生了显著变化。如图 1 所示，从 2010 年起，技术进步对各区域碳排放风险影响的程度逐步提升，2018 年技术进步对碳排放预警指数的影响权重达到 15 年来的峰值 0.616，主要是由于 2015 年《巴黎气候协定》后各级地方政府碳减排政策推动了规模以上工业企业技术引进经费大规模提升所致。

2.2 能源消费监测预警指数分析

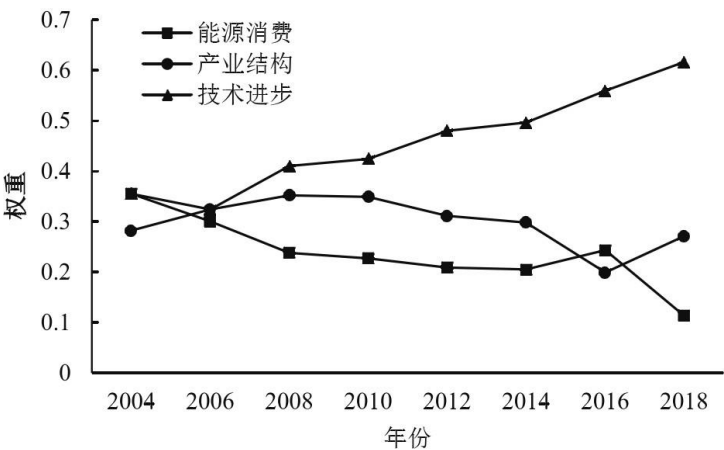


图 1 2004—2018 年影响权重变动状况

能源消费分项预警指标在整个碳排放预警指标中的权重逐步降低(图 1)，2018 年降到最低值 0.113，说明能源消费预警指标在各省份之间的差异越来越小，即我国能源消费整体状况得到了优化。2018 年处于红色预警等级的省份有 3 个，处于橙色和黄色预警区间的省份分别有 6 个、13 个，处于蓝色和绿色预警区间的省份分别有 5 个、3 个(表 5)。

表 5 2018 年能源消费监测预警等级分布表

预警等级	能源消费预警指数	省份个数	省份名称
红色	(0, 0.33)	3	内蒙古、宁夏、山西
橙色	[0.33, 0.39)	6	吉林、辽宁、湖南、广西、云南、甘肃
黄色	[0.39, 0.52)	13	上海、天津、黑龙江、河北、山东、河南、安徽、湖北、江西、福建、贵州、青海、新疆
蓝色	[0.52, 0.59)	5	陕西、重庆、浙江、广东、海南
绿色	[0.59, +∞)	3	北京、江苏、四川

构成能源消费分项预警指标的 4 项指标：能源消费结构、能源消费规模、能源利用效率以及能源依赖程度对其影响程度随时间而波动，如图 2 所示。2004—2018 年，4 项指标对能源消费预警指数影响权重均值分别为 0.429、0.228、0.045、0.296，标准差分别为 0.081、0.049、0.014、0.121，即能源消费结构和能源依赖程度对预警指数的平均影响较大，说明各省份将调整能

源消费结构、降低经济发展对能源的依赖性作为降低碳排放的重要举措；特别是能源依赖程度权重方差最大，说明各省份经济发展对能源依赖的差异尤为显著。从具体指标看，天然气消费占比 (D_5) 和天然气消费总量 (D_6) 对能源消费预警指数的平均影响最大，样本期影响权重的均值分别为 0.286、0.199。表明清洁能源使用规模和比重在各省份中的差异较大，也是导致各省份能源消费预警指数差异较大的主要原因。

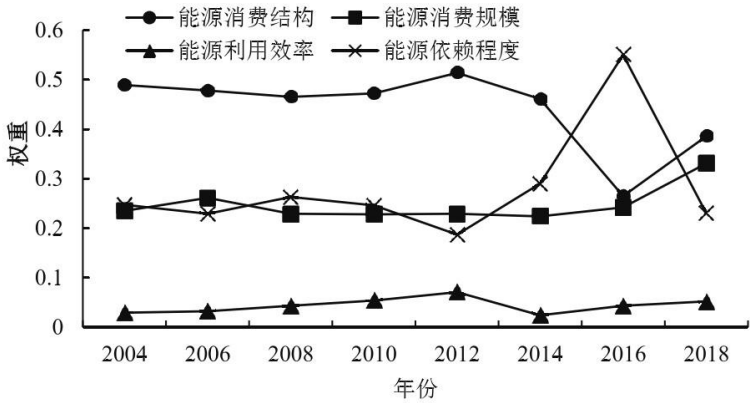


图 2 2004—2018 年能源消费指标权重变动图

能源消费结构长期以来对能源消费预警指数发挥着重要影响，但这种影响整体呈现下降趋势，说明各省份积极调整能源消费结构，降低化石能源消耗比重，提升清洁能源的使用比例。各省份之间能源消耗结构仍存在显著差异，但差异程度在不断降低，即整体能源消费结构在逐步优化。从历年各省份能源消费结构预警得分可知，以北京、天津、重庆、四川、海南、青海、新疆等为代表的省份，其能源消费结构预警指数较高，说明其能源消费结构处于全国较高水平；而以山西、内蒙古、辽宁、云南等为代表的省份，其能源消费结构处于全国较低水平，仍需进一步优化。

能源依赖程度对能源消费预警指标的影响权重波动程度最大，且影响程度随时间呈上升趋势。2015 年能源依赖程度的影响权重达到了顶峰 0.584，这主要是由于为达到有效降低碳排放的效果，各省份将经济发展与能源消耗脱钩作为一项重要的政策予以推广，从而快速降低化石能源使用范围。从时间角度看，近年来各省份经济发展对能源依赖程度整体上处于逐步降低趋势，但各省份之间经济发展对能源消耗的依赖程度差异仍较大，且山西、内蒙古等省份的能源依赖程度依然处于全国较高水平。

能源消费规模对能源消费预警指数产生直接影响，特别是化石能源总量控制已经成为降低碳排放强度研究中亟待解决的重要问题。能源消费总量的影响权重自 2015 年后快速提升，由 2015 年的 0.126 上升到 2018 年的 0.331，表明各省份在能源消费总量控制方面存在的差异在不断加剧。

能源利用效率对能源消费预警指数的影响权重相对较小，说明各省份之间能源利用效率差距不大，因此该指标的权重较小。但是分析具体指标可知，宁夏、青海、新疆、山西、内蒙古的单位 GDP 能源消耗较高，长期处于高能耗低产出的行列。

2.3 产业结构监测预警指数分析

2018 年，产业结构分项预警指数处于红色预警区间的省份为山西和河北，处于橙色预警区间的省份为山东、河南、安徽、贵州、湖南、海南、宁夏、甘肃和新疆，处于绿色预警区间的省份是广东、北京和四川(表 6)。

表 6 2018 年产业结构监测预警等级分布表

预警等级	产业结构预警指数	省份个数	省份名称
红色	(0, 0.11)	2	山西、河北
橙色	[0.11, 0.17)	9	山东、河南、安徽、湖南、贵州、海南、宁夏、甘肃、新疆
黄色	[0.17, 0.30)	14	上海、天津、江苏、黑龙江、吉林、辽宁、内蒙古、陕西、湖北、江西、福建、重庆、云南、广西
蓝色	[0.30, 0.36)	2	浙江、青海
绿色	[0.36, +∞)	3	北京、广东、四川

产业结构监测预警指数由六部分组成，分别是产业结构优化、能源产业结构、工业碳排放规模、农业碳排放规模、林业碳吸收规模和高新技术产业规模。由图 3 可以看出，能源产业结构对产业结构监测预警指数的影响最大且较平稳，2004—2018 年，其影响权重位于[0.363, 0.439]区间，说明能源产业结构在全国各省份中非常不平衡，随着碳减排对经济发展压力的显现，各省份能源产业结构将继续调整优化。数据分析结果显示，能源产业结构发展较好的区域有北京、广东、四川、浙江等省份，而山西、河北、内蒙古等省份能源产业结构处于全国较低水平。

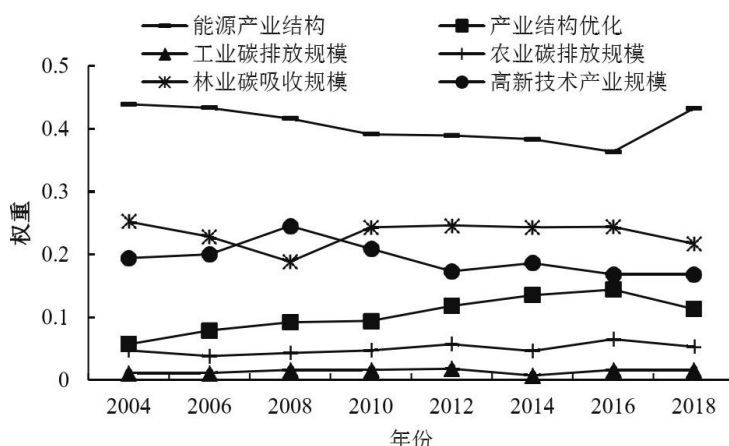


图 3 2004—2018 年产业结构指标权重变动图

林业碳吸收规模对产业结构预警指数的影响也较大，但整体看来，其影响趋于缓慢下降。林业碳汇对于碳排放吸收具有重要意义，同时对于生态环境的改善也具有积极影响。2017 年我国年度人工造林面积(4296 千公顷)和林业投资(4800 亿元)达到近年来峰值。受林业规模基数、产业布局特征以及区域地理环境等因素制约，各省份在林业规模方面的差异较大。整体来看，山西、河北、河南等省份在林业碳汇建设方面处于全国较低水平。

高新技术产业对各省份优化产业结构、培育经济发展新动能以及降低碳排放强度会产生重要影响，是碳排放监测重要的先行指标。近年来，高新技术产业规模较大的省份包括广东、浙江、江苏、上海、四川、河南等，而宁夏、新疆、海南、黑龙江、吉林、山西、内蒙古、云南等省份的高新技术产业规模则亟待改善。

产业结构优化对降低碳排放强度、促进区域经济可持续发展具有深远影响。从时间角度看，产业结构升级对预警指数的影响

权重呈现逐步上升的趋势，这一影响在 2016 年达到峰值 0.144，随后逐步降低，这说明全国各省份在产业结构调整方面存在的差异呈现逐步扩大的趋势。数据结果显示，这种差距主要是由产业结构高级化引起的，而产业结构合理化的影响基本稳定且影响程度较低。

农业碳排放规模和工业碳排放规模的影响权重较低，且较稳定，说明全国各省份在农业碳排放规模和工业碳排放规模方面的差异较小。数据结果显示，工业碳排放依然是碳排放重点核心领域，山西、内蒙古、河北、黑龙江等省份长期处于全国较低水平；农业碳排放整体表现较好，其中，上海、重庆表现较为突出，山东、河北、河南等省份波动程度较高。

2.4 技术进步监测预警指数分析

2018 年，技术进步监测预警指数处于红色预警区间的省份为青海，处于橙色预警区间的省份有吉林、贵州、甘肃、宁夏、新疆，处于安全区间的省份是广东和上海，处于风险较小的蓝色预警区间的是江苏，其余省份处于黄色预警区间(表 7)，说明技术进步在各省份之间的差异较大，且两极分化程度逐步严重。分项预警指数显示，广东、上海、江苏等省份的技术进步水平长期处于全国较高水平，且持续呈现上升趋势；而青海、新疆、甘肃等省份的技术进步水平则长期处于较低水平。

表 7 2018 年技术进步监测预警等级分布表

预警等级	技术进步预警指数	省份个数	省份名称
红色	(0, 0.001)	1	青海
橙色	[0.001, 0.02)	5	吉林、贵州、宁夏、甘肃、新疆
黄色	[0.02, 0.22)	21	北京、天津、河北、山东、山西、河南、安徽、浙江、湖南、湖北、陕西、四川、重庆、海南、江西、福建、云南、广西、黑龙江、辽宁、内蒙古
蓝色	[0.22, 0.32)	2	江苏
绿色	[0.32, +∞)	3	上海、广东

技术进步监测预警指数由技术引进、技术购买和技术改造 3 个指标构成。由图 4 可以看出，技术引进的影响权重最大，其均值为 0.423，说明全国各省份在技术引进方面差异较大，且这种差异随时间呈现逐步扩大的趋势，2018 年达到最大值 0.476。技术购买对技术进步预警指数的平均影响权重为 0.357，且波动状态不明显，较平稳，说明各省份在技术购买方面的差异程度基本维持在稳定状态。技术改造对技术进步预警指数的平均影响权重为 0.220，且自 2011 年权重呈现下降趋势，即各省份在技术改造方面的差异越来越小，2018 年达到最小值 0.153。

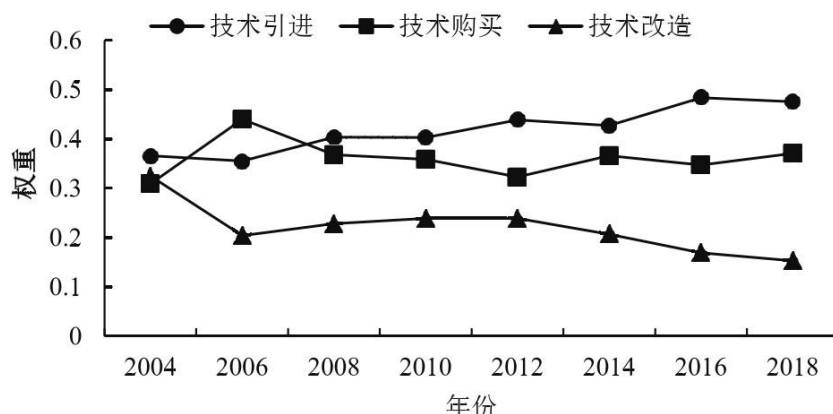


图 4 2004—2018 年技术进步指标权重变动图

3 结论

(1) 2004—2018 年，我国碳排放预警指数整体上处于上升趋势，处于红色预警区间的省份逐步减少。长期来看，北京、上海、广东、浙江、江苏等地的碳排放预警指数处于风险较小的蓝色或绿色预警区间，而山西、河北、贵州、甘肃等地长期处于风险较高的橙色或红色预警区间，且 2016 年之后，区域之间碳减排潜力之间的差距正不断扩大。

(2) 技术进步分项预警指数对碳排放预警综合指数的影响最大。不同省份之间技术进步水平的差异较大是导致碳排放预警指数差距较大的主要原因。2015 年后，技术引进规模的差异快速扩大，导致技术进步的差异逐步扩大。青海、新疆、甘肃、宁夏、贵州和吉林等省份的技术进步预警指数处于红色或橙色区间，未来工业企业技术升级是其降低碳排放的有效途径。

(3) 产业结构分项预警指数对碳排放的影响整体呈现下降趋势。能源产业结构对产业结构预警指数影响最大，其次是林业碳吸收规模，即各省份在能源产业结构与林业规模方面的差异显著。山西、河北、内蒙古、河南等省份长期处于能源产业结构和林业碳吸收规模的红色或橙色等高风险区；高新技术产业对各省份降低碳排放强度产生重要影响，而农业碳排放和工业碳排放在各省份之间的差异相对较小，山西、内蒙古、河北和黑龙江等省份处于该指标的高风险区。综合来看，产业结构中高风险区未来碳减排重点应集中在增加清洁低碳能源消费比例，扩大造林面积以及提升高新技术产业规模等方面。

(4) 能源消费会对碳排放产生直接和显著的影响。从时间角度看，能源消费对碳排放综合指数的影响最小且随时间呈现进一步下降趋势，能源消费状况得到了一定程度的优化，但现状仍不乐观。2018 年，山西、内蒙古、宁夏处于能源消费预警指标的红色预警区间，而吉林、辽宁、甘肃、湖南、广西、云南处于橙色预警区间。综上，能源结构优化，推广节能技术，提高光伏等低碳清洁能源以及太阳能、风能等零碳能源的使用规模和比重是减小能源消费高风险省份碳排放风险的重要途径。

参考文献:

- [1] 国务院. 中华人民共和国国民经济和社会发展第十四个五年规划和 2035 年远景目标纲要 [EB/OL]. (2021-03-13). http://www.gov.cn/xinwen/2021-03/13/content_5592681.htm.
- [2] 丛日杰, 韩洁平. 基于人工神经网络的我国火电厂碳排放预警评价研究——以吉林省某火电厂为例[J]. 生态经济, 2019(10): 37-41.
- [3] 赵桂芹. 中国出口贸易碳排放的测度与预警研究[J]. 生态经济, 2018(9): 19-24.

-
- [4]周志方, 肖恬. 基于支持向量机的重污染工业企业碳风险预警研究[J]. 环境污染与防治, 2016(1): 82-89.
- [5]崔金栋, 徐宝祥, 韩洁平. 基于 Folksonomy 和本体建模的碳排放预警指标体系构建[J]. 情报科学, 2013(12): 126-129.
- [6]林伯强, 蒋竺均. 中国二氧化碳的环境库兹涅茨曲线预测及影响因素分析[J]. 管理世界, 2009(4): 27-36.
- [7]鲁万波, 仇婷婷, 杜磊. 中国不同经济增长阶段碳排放影响因素研究[J]. 经济研究, 2013(4): 106-118.
- [8]许广月, 宋德勇. 中国碳排放环境库兹涅茨曲线的实证研究——基于省域面板数据[J]. 中国工业经济, 2010(5): 37-47.
- [9]杨骞, 刘华军. 中国二氧化碳排放的区域差异分解及影响因素——基于 1995—2009 年省际面板数据的研究[J]. 数量经济技术经济研究, 2012(5): 36-49, 148.
- [10]朱勤, 彭希哲, 陆志明, 等. 中国能源消费碳排放变化的因素分解及实证分析[J]. 资源科学, 2009(12): 2072-2079.
- [11]张友国. 经济发展方式变化对中国碳排放强度的影响[J]. 经济研究, 2010(4): 120-133.
- [12]王勇, 王颖. 中国实现碳减排双控目标的可行性及最优路径——能源结构优化的视角[J]. 中国环境科学, 2019(10): 4444-4455.
- [13]马晓君, 董碧滢, 于渊博, 等. 东北三省能源消费碳排放测度及影响因素[J]. 中国环境科学, 2018(8): 3170-3179.
- [14]王文举, 向其凤. 中国产业结构调整及其节能减排潜力评估[J]. 中国工业经济, 2014(1): 44-56.
- [15]吴振信, 谢晓晶, 王书平. 经济增长、产业结构对碳排放的影响分析——基于中国的省际面板数据[J]. 中国管理科学, 2012(3): 161-166.
- [16]虞义华, 郑新业, 张莉. 经济发展水平、产业结构与碳排放强度——中国省级面板数据分析[J]. 经济理论与经济管理, 2011(3): 72-81.
- [17]原媛, 席强敏, 孙铁山, 等. 产业结构对区域碳排放的影响——基于多国数据的实证分析[J]. 地理研究, 2016(1): 82-94.
- [18]张丽峰. 我国产业结构、能源结构和碳排放关系研究[J]. 干旱区资源与环境, 2011(5): 1-7.
- [19]张伟, 朱启贵, 高辉. 产业结构升级、能源结构优化与产业体系低碳化发展[J]. 经济研究, 2016(12): 62-75.
- [20]郭庆宾, 骆康, 杨婉蓉. 基于技术进步的长江经济带碳排放回弹效应测度[J]. 统计与决策, 2020(19): 115-117.
- [21]林伯强, 徐斌. 研发投入、碳强度与区域二氧化碳排放[J]. 厦门大学学报(哲学社会科学版), 2020(4): 70-84.
- [22]刘备, 董直庆. 技术进步的能源偏向诱发“碳锁定效应”了吗[J]. 产经评论, 2020(4): 133-148.

[23]刘自敏, 申颢. 有偏技术进步与中国城市碳强度下降[J]. 科学学研究, 2020(12): 2150-2160.

[24]徐德义, 马瑞阳, 朱永光. 技术进步能抑制中国二氧化碳排放吗?——基于面板分位数模型的实证研究[J]. 科技管理研究, 2020(16): 251-259.

[25]苏凯, 陈毅辉, 范水生, 等. 市域能源碳排放影响因素分析及减碳机制研究——以福建省为例[J]. 中国环境科学, 2019(2): 859-867.