E-Commerce Letters 电子商务评论, 2024, 13(3), 4791-4806
Published Online August 2024 in Hans. https://www.hanspub.org/journal/ecl
https://doi.org/10.12677/ecl.2024.133589

# 云制造下基于时空熵权TOPSIS和SOM聚类的区域绿色制造发展水平测度研究

**张潇逸[1]，张人龙[1,2*]，刘小红[1,2*]**

[1]贵州大学管理学院，贵州 贵阳
[2]喀斯特地区发展战略研究中心，贵州 贵阳

收稿日期：2024年4月17日；录用日期：2024年4月30日；发布日期：2024年8月1日

## 摘 要

**当前，中国正经历以数字化和绿色化为主题的第四次工业革命时期。在数字经济腾飞，智能制造转型的浪潮中，各地制造业积极响应国家号召，涌现出不少新兴智能绿色制造企业。本文通过时空熵权TOPSIS评价法对2012~2021年中国30个省份的绿色制造水平进行了测度，构建了绿色排放、绿色质效、科技创新、资源利用、绿色治理五个维度的指标。研究发现：1) 在东、中、西部地区中，东部地区绿色制造发展水平常年处于领先水平，而中、西部地区相对较低，其中，“四绿”的建设发展是影响区域绿色制造发展水平的重要因素；2) 整体趋势显示，2012~2015年，不论是东部还是中西部地区，绿色制造发展指数呈下降趋势，直到2016年，“绿色制造”概念的提出及“四绿”建设扭转了这一趋势，缓解了经济发展与环境保护矛盾；3) 历年绿色制造发展水平可划分为四个梯队，第一梯队数量逐年增加，但第四梯队仍较高，主要集中在中、西部，尤其是西部，中、西绿色制造发展水平不足问题依然突出。最后，论文提出了云制造资源优化配置的管理建议。**

## 关键词

**云制造，绿色制造，发展水平，时空熵权TOPSIS，SOM**

# Research on Regional Green Manufacturing Development Level Measurement Based on Temporal and Spatial Entropy Weighted TOPSIS and SOM Clustering in Cloud Manufacturing

*通讯作者。

文章引用: 张潇逸, 张人龙, 刘小红. 云制造下基于时空熵权 TOPSIS 和 SOM 聚类的区域绿色制造发展水平测度研究[J]. 电子商务评论, 2024, 13(3): 4791-4806. DOI: 10.12677/ecl.2024.133589

**Xiaoyi Zhang[1], Renlong Zhang[1,2*], Xiaohong Liu[1,2*]**

[1]School of Management, Guizhou University, Guiyang Guizhou
[2]Research Center of Karst Development Strategy, Guiyang Guizhou

Received: Apr. 17th, 2024; accepted: Apr. 30th, 2024; published: Aug. 1st, 2024

## Abstract

**Currently, China is experiencing a period of the fourth industrial revolution themed on intelligence and greening. In the wave of digital economy taking off and smart manufacturing transformation, manufacturing industries around the world have actively responded to the national call, and many emerging smart manufacturing enterprises have emerged. This paper measures the green manufacturing level of 30 provinces in China from 2012 to 2021 through the spatio-temporal entropy weighted TOPSIS evaluation method, and constructs indicators in five dimensions: green emission, green quality and efficiency, scientific and technological innovation, resource utilization, and green governance. The study found that: 1) The development level of green manufacturing in the eastern region has been high, while the central and western regions are relatively low, and the construction of the "four greens" is an important factor influencing the development level of regional green manufacturing; 2) The overall trend shows that from 2012 to 2015, the green manufacturing development index in both eastern and central and western regions showed a downward trend, until 2016, when the concept of "green manufacturing" and the construction of the "four greens" reversed the trend and alleviated the contradiction between economic development and environmental protection; 3) The level of green manufacturing development in the past years can be divided into four echelons, with the first echelon increasing year by year, but the fourth echelon is still relatively low. The first echelon is increasing year by year, but the fourth echelon is still higher, mainly concentrated in the central and western parts of the country, especially in the west, where the problem of insufficient development level of green manufacturing in the central and western parts of the country is still prominent. Finally, the paper proposes management suggestions for optimizing resource allocation in cloud manufacturing.**

## Keywords

**Cloud Manufacturing, Green Manufacturing, Development Level, Spatio-Temporal Entropy Weight TOPSIS, SOM**

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.
This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).
http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/
Open Access

## 1. 引言

随着数字技术飞速发展，推动经济升级、提高生产效率。全球范围内数字化和自动化技术的普及，以及人工智能、大数据的应用，使得数字经济与智能制造成为全球经济的引擎。各国纷纷加强研究，制定战略计划，以适应数字时代的经济格局。深入研究这些领域，不仅洞察未来经济趋势，还能为政策和战略提供科学依据。

制造业作为实体经济的主体，在现代产业体系中占据着非常重要的地位，制造业的强弱决定着一个

国家的国际地位。因此，工业制造业的发展成为了各个国家近几个世纪的时代主题，但是随着工业制造业的发展，经济的发展给生态环境带来了前所未有的压力，为了缓解此压力，20 世纪 90 年代，可持续制造(也称之为绿色制造)的概念应运而生，并且从“90 年代的技术”[1]到“新千年的关注”[2]，逐步成为了各个国家追求工业制造业绿色可持续发展的前沿。

2016 年，我国工信部发布了《工业绿色发展规划(2016~2020 年)》，深入贯彻落实“创新、协调、绿色、开放、共享”五大发展理念，举起了全面推动工业绿色发展的大旗。同年 9 月，工信部和综合利用司发布了《绿色制造工程实施指南(2016~2020 年)》和《关于推进绿色制造体系建设的通知》，明确了全面发展绿色制造体系的主要内容，包括绿色工厂、绿色园区、绿色产品、绿色供应链(以下简称“四绿”)，研究者们紧跟国家的脚步，纷纷从绿色制造的建设路径[3]、发展现状与未来路径[4]等探讨了我国绿色制造的发展体系。在新时代，绿色制造成为了制造业高质量发展的内在要求。

绿色制造是以提升效率、实现人与自然和谐共生，以及以实现可持续发展为主要目标的经济增长的制造方式，而工业是消耗能源资源和产生污染物排放的主要领域，因此，实现绿色制造的关键就在于实现工业绿色化发展，一方面，需要构建低能耗，高产出的现代化制造体系，另一方面，我们需要扶持培育一些节能环保的新兴产业，但是我国绿色制造发展的现状怎样？驱动和制约我国绿色制造发展的因素包括哪些？如何科学的构建绿色制造指标对发展水平进行测度？我国绿色制造发展的时空趋势是怎样的？精准把握这些问题有助于推动我国工业制造业的绿色发展。

目前，对于工业绿色发展水平测度与评价的研究成果丰富，在企业层面上，李金华[5]以 2016 年我国工信部出台的绿色工厂评定政策为研究对象，结合上市企业数据，系统检验了绿色产业政策的股价效应及其内在机制，曹裕等[6]基于资源编排理论，对数字化驱动制造业企业绿色转型的阶段特征和内在机制进行了研究探索，Salem A H *et al.* [7]提出了一个评价制造企业绿色度的工具箱(绿度计)并且通过三个不同的行业来证明所开发的绿度计的适用性，林志炳等[8]从社会效益的层面上，探讨了制造商企业对零售商自有品牌策略的影响。

在区域层面上，邵帅等[9]提出了基于数据包络法的新型测度模型，对我国 30 个省份 1998~2018 年碳排放绩效进行了更准确的测度与分解，并且利用空间杜宾模型研究了反映经济结构调整和绿色技术进步的多维因素对碳排放绩效的直接和间接效应。游建民等[10]以国家生态文明试验区贵州为例，构建了绿色制造评价体系测度了 2006~2016 年贵州省的绿色制造绩效，王鸣涛等[11]重新界定了绿色制造的内涵，并且构建了相应维度的指标体系，对我国 30 个地区工业绿色制造水平进行了研究，李志鹏等[12]更是扩展了研究时空区域，并且从绿色经营能力、资源利用能力、环境共生能力和绿色创新能力四个维度对我国 30 个省份进行了时空演变特征分析，黄晓杏等[13]从绿色创新投入、创新效益产出、经济效益产出、绿色效益产出、绿色制造、绿色产品市场开拓、绿色管理和绿色政策环境支持八个方面构建区域绿色创新系统成熟度的评价指标体系，分析了我国 2007~2016 年绿色创新成熟度综合水平测算，Valenzuela-Venegas G *et al.* [14]通过对可持续发展的指标进行了搜索和分类，对 249 个环境影响评价指标进行分维度研究测评，并制定了评价指标的四个标准。

然而现在文献存在以下的不足：第一，对于国内区域层面绿色制造发展指数的测度评价相关研究较少；第二，大多数文献使用了绿色全要素生产率来评价工业的绿色创新发展，但是所构建的指标数量较少，从一定程度上很难从多维度的层面去评价测度区域绿色制造水平；第三，以往文献少有对“四绿”建设的描述，以及其对绿色制造发展的影响。基于这些问题，本文从经济效益、生态效益和社会效益三个维度建立指标体系，并且将这三个维度具体划分为绿色排放，绿色质效，科技创新，资源利用，绿色治理五个层面的指标，基于时空熵权 TOPSIS 评价法模型[15]测度 2012~2021 年 30 个省份的绿色制造发展水平，在此基础上对绿色制造发展水平的空间差异进行深入分析，并且利用 SOM 神经网络模型对梯队

划分格局进行研究。

## 2. 指标构建

“中国工程院绿色制造发展战略研究”课题组[16]在指标构建和筛选方面，以社会需求、环境影响、资源效率和经济效益为基础，深入探讨了绿色制造的内涵。他们强调在产品的整个生命周期内，必须确保能源利用率最高(能耗最低)，同时最大限度地减少对自然环境的负面影响，实现无害或危害极小的目标。此外，一些学者融合了产品的全生命周期[17]、工业工程[18]等多个角度出发，他们强调，在确保产品质量和功能的前提下，通过借助先进科技，使产品在整个生命周期内实现环境污染最小化，将能源消耗降至最低水平，实现经济效益和社会效益的协调发展。

因此，本文以绿色制造的内涵为基础，参考多位学者的研究成果，对现有的指标体系进行了归纳，如表 1。

**Table 1.** Research results on the construction of the indicator system
**表 1.** 指标体系构建研究成果

| 作者 | 指标体系 |
|---|---|
| 游建民等[10] | 发展效益、资源利用、污染排放、环境保护、科技创新 |
| 王鸣涛等[11] | 绿色生产、绿色排放、绿色科技、绿色质效 |
| 李志鹏等[12] | 绿色经营能力、资源利用能力、环境共生能力、绿色创新能力 |
| 黄晓杏等[13] | 绿色创新投入、创新效益产出、经济效益产出、绿色效益产出、绿色制造、绿色产品市场开拓、绿色管理和绿色政策环境支持 |
| Valenzuela-Venegas G *et al.* [14] | 废水收集和处理能力、废物收集及中央处理设施许可证、COD 环境容量、$SO_2$ 环境容量、公园水生产率的增加等 249 项指标 |
| 汪凌等[19] | 发展质量、环境治理、资源利用 |
| 明翠琴等[20] | 环境污染物排放水平、环境破坏程度、资源能源基础、环境污染和破坏的负外部性成本等 |
| 王曰芬等[21] | 环境质量、保护治理、生态压力、资源利用、经济发展、绿色生活、社会发展 |
| 李晔等[22] | 经济发展、绿色生活、资源利用、环境治理 |

表 1 显示，在构建绿色制造指标体系的过程中，研究者主要关注经济效益、资源利用和环境保护三个方面。然而，很多研究未能充分考虑“四绿”对绿色制造发展水平的全面影响。因此，本文融入绿色制造的内涵进行深入研究，将关注点从重视经济效益的工业革命时期演变为更为注重考虑工业生态效益的阶段。这一思考框架包括对污染物排放情况的关注，以及强调工业产品最终需要对社会做出回馈，满足社会效益的需求。社会效益的考虑不仅包含对工业污染物治理情况的深入研究，还包括对科技创新情况的全面分析。为了相对科学地综合评估绿色制造的发展，本文从经济效益、生态效益和社会效益这三个关键维度出发，构建了一个包含 21 个基础指标的绿色制造水平测度指标体系。详细的指标内容可见于下表 2。这一综合指标体系的制定旨在更全面、科学地反映绿色制造的发展水平，为未来的研究和实践提供深刻洞察。

## 3. 绿色制造发展指数评价模型的构建

### 3.1. 熵权法

熵权法是一种客观的赋权法，该方法利用信息熵来计算指标的权重。若指标的变异度小，则说明其

**Table 2.** Construction of the indicator system
**表 2.** 指标体系构建

| | 维度 | 分项指标 | 基础指标 | 代码 |
|---|---|---|---|---|
| 绿色制造发展指数 | 经济效益 | 绿色成果 | 绿色工厂数量(个) | C1 |
| | | | 绿色园区数量(个) | C2 |
| | | | 绿色产品设计数量(个) | C3 |
| | | | 绿色供应链管理示范企业(个) | C4 |
| | | 经济收益 | 工业主营业务收入 | C5 |
| | | | 固定资产净额 | C6 |
| | | | 工业利润总额 | C7 |
| | | | 工业增加值占 GDP 比重(%) | C8 |
| | 生态效益 | 绿色排放 | 单位工业增加值废水排放总量(吨/万元) | C9 |
| | | | 单位工业增加值二氧化硫排放总量(吨/万元) | C10 |
| | | | 单位工业增加值 COD 排放量(吨/万元) | C11 |
| | | | 单位工业增加值氮氧化物排放量(立方米/万元) | C12 |
| | | | 单位工业增加值粉尘排放总量(吨/万元) | C13 |
| | | | 单位工业增加值综合能耗(吨标准煤/万元) | C14 |
| | | 资源利用 | 单位工业增加值用水量(立方米/万元) | C15 |
| | | | 单位工业增加值用电量(亿千瓦时/万元) | C16 |
| | | | 工业废气治理设施(套) | C17 |
| | 社会效益 | 绿色治理 | 工业污染源治理投资(亿) | C18 |
| | | | 治理废水(万元) | C19 |
| | | | 治理废气(万元) | C20 |
| | | | 治理固体废物(万元) | C21 |
| | | | 工业固体废物综合利用率(%) | C22 |
| | | | 一般固体废物综合利用率(%) | C23 |
| | | 科技创新 | 规模以上工业企业 RD 经费(万元) | C24 |
| | | | 规模以上工业企业 RD 项目数(项) | C25 |
| | | | 工业企业 R & D 人员占比(%) | C26 |
| | | | 当年获得的绿色发明专利数量(个) | C27 |

信息熵较大，在评级体系中的作用就相对较小，所以权重较小，反之权重就会相对较大，本文利用熵权法，对绿色制造评价指标进行权重计算，结合 TOPSIS 对绿色制造发展指数进行测度，假设有 $m$ 个评价对象，$n$ 个评价指标，$x_{ij}$ 为评价对象 $i$ 的第 $j$ 项指标原始数据，下面是熵权法计算各类指标权重的步骤：

(1) 数据标准化处理：

$$y_{ij} = \frac{x_{ij} - \min\left(x_{ij}\right)}{\max\left(x_{ij}\right) - \min\left(x_{ij}\right)} \tag{1}$$

$$y_{ij}=\frac{\max\left(x_{ij}\right)-x_{ij}}{\max\left(x_{ij}\right)-\min\left(x_{ij}\right)} \tag{2}$$

(2) 计算第 $j$ 个指标下第 $i$ 个评价对象的特征比重：

$$r_{ij}=y_{ij}\Big/\sum_{i=1}^{m}y_{ij} \tag{3}$$

(3) 计算信息熵：

$$e_{ij}=-\frac{1}{\ln m}\sum_{i=1}^{m}\left(r_{ij}\times\ln r_{ij}\right) \tag{4}$$

(4) 计算权重值：

$$w_j=\left(1-e_{ij}\right)\Big/\sum_{j=1}^{n}\left(1-e_{ij}\right) \tag{5}$$

### 3.2. TOPSIS 法

计算完权重，下面需要对各个对象的评价值进行计算，利用 TOPSIS，计算得到各项指标正理想解与负理想解，再计算出各个评价对象与正/负理想解的欧式距离，得到与最优方案的接近程度，具体步骤如下：

1) 逆向指标正向化(为了方便描述，下文仍用 $x_{ij}$ 代替 $x_{ij}^{*}$)：

$$x_{ij}^{*}=1\Big/x_{ij} \tag{6}$$

2) 无量纲化处理，得到规范矩阵 $G$：

$$G=\left[g_{ij}\right]=\left[x_{ij}\Big/\sqrt{\sum_{i=1}^{m}x_{ij}^{2}}\right] \tag{7}$$

3) 结合指标权重构建规范矩阵 $Z$：

$$Z=\left[w_j\times g_{ij}\right]_{m\times n} \tag{8}$$

4) 确定各项指标的正/负理想解

正理想解：

$$Z_j^{+}=\left[z_1^{+},z_2^{+},\cdots,z_n^{+}\right]\ \left(j=1,2,3,\cdots,n\right) \tag{9}$$

负理想解：

$$Z_j^{-}=\left[z_1^{-},z_2^{-},\cdots,z_n^{-}\right]\ \left(j=1,2,3,\cdots,n\right) \tag{10}$$

其中 $Z_j^{+}$ 和 $Z_j^{-}$ 分别为第 $j$ 项指标在矩阵 $Z$ 中的最大值和最小值。

5) 计算各个评价对象与正/负理想解的距离：

$$d_i^{+}=\sqrt{\sum_{j=1}^{n}\left(z_{ij}-z_j^{+}\right)^{2}} \tag{11}$$

$$d_i^{-}=\sqrt{\sum_{j=1}^{n}\left(z_{ij}-z_j^{-}\right)^{2}} \tag{12}$$

6) 计算各个评价对象的相对贴进度：

$$S_i = \frac{d_i^-}{d_i^+ + d_i^-} \tag{13}$$

### 3.3. 时空 TOPSIS 法

第一次熵权 TOPSIS 评价：对固定时间 $t$ 直接处理截面数据，直接使用 TOPSIS 评价，由上式可知，个体 $i$ 在固定时间 $t$ 的综合得分记为 $S_{it}(i=1,2,3,\cdots,m)$。将截面数据分析得到的综合得分用实数 $S_{it}$ 表示。

第二次熵权 TOPSIS 评价：对个体 $i$ 在时段 $T_1 \subseteq \{t_1,t_2,t_3,\cdots,t_d\}$ 内的表现进行分析，记为 $T=\{t_1,t_2,t_3,\cdots,t_{d1}\}$。对于每个个体 $I(i=1,2,3,\cdots,m)$，都有 $t \in T_1$ 的综合评价值 $(S_{i1},S_{i2},S_{i3},\cdots,S_{idt})$，这是时间维度 $dt$ 的单指标面板数据，之后将时间视作指标，对 $(S_{i1},S_{i2},S_{i3},\cdots,S_{idt})_{m\times dt}$ 再进行熵权 TOPSIS 评价。

## 4. 实证分析

### 4.1. 数据来源

根据表 1 所构建的指标体系，本文选取我国 30 个省份(不含西藏和港澳台)作为研究对象，测算 2012~2021 年各地区绿色制造的发展水平，相关数据来源于，2013~2022 年的《中国统计年鉴》、《中国工业统计年鉴》、《中国环境统计年鉴》、《中国能源统计年鉴》以及各地区的统计年鉴与年度报表，对于一些缺失的数据，本文使用了多重插值法进行补充。

### 4.2. 绿色制造水平测度

#### 4.2.1. 指标权重计算

按照公式(1)~(5)计算处理每年各项指标的权重结果，并对各指标综合权重进行排序，如表 3 所示，其中占据指标前五的是治理固体废物(C21)、规模以上工业企业 RD 项目数(C25)、当年获得的绿色发明专利数量(C27)，规模以上工业企业 RD 经费(C24)、绿色园区数量(C2)权重依次是：11.8%、7.1%、6.8%、6.5%、6.3%，说明在整体发展绿色制造时，在注重“四绿”建设发展的同时，也需要考虑到绿色环境的治理和科技创新的研发，“四绿”的建设、科技创新和绿色治理方案是绿色制造发展中最重要，同时也是最息息相关的三个方向，在绿色工厂、绿色产品设计和绿色供应链企业还没有建立时，科技创新和绿色治理这两者对绿色制造的发展起到了重要作用。

**Table 3.** Weights of measurement indicators for the development level of green manufacturing
**表 3.** 绿色制造发展水平测度指标权重

| 指标 | 2012 | 2013 | 2014 | 2015 | 2016 | 2017 | 2018 | 2019 | 2020 | 2021 | 综合 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| C1 | 0.0273 | 0.0275 | 0.0273 | 0.0274 | 0.0231 | 0.0528 | 0.0552 | 0.0390 | 0.0118 | 0.0144 | 0.0306 |
| C2 | 0.0273 | 0.0275 | 0.0273 | 0.0274 | 0.0231 | 0.1310 | 0.1050 | 0.0980 | 0.0714 | 0.0985 | 0.0637 |
| C3 | 0.0273 | 0.0275 | 0.0273 | 0.0274 | 0.0231 | 0.0469 | 0.0319 | 0.0281 | 0.0295 | 0.0326 | 0.0302 |
| C4 | 0.0273 | 0.0275 | 0.0273 | 0.0274 | 0.0231 | 0.1084 | 0.0848 | 0.0537 | 0.0714 | 0.0985 | 0.0549 |
| C5 | 0.0580 | 0.0567 | 0.0573 | 0.0596 | 0.0518 | 0.0366 | 0.0397 | 0.0409 | 0.0412 | 0.0426 | 0.0484 |
| C6 | 0.0353 | 0.0353 | 0.0354 | 0.0360 | 0.0306 | 0.0200 | 0.0221 | 0.0087 | 0.0232 | 0.0261 | 0.0273 |
| C7 | 0.0528 | 0.0556 | 0.0615 | 0.0608 | 0.0590 | 0.0360 | 0.0567 | 0.0230 | 0.0419 | 0.0371 | 0.0484 |
| C8 | 0.0117 | 0.0110 | 0.0113 | 0.0164 | 0.0121 | 0.0081 | 0.0083 | 0.0243 | 0.0081 | 0.0083 | 0.0120 |
| C9 | 0.0071 | 0.0084 | 0.0160 | 0.0115 | 0.0137 | 0.0079 | 0.0087 | 0.0114 | 0.0109 | 0.0073 | 0.0103 |
| C10 | 0.0044 | 0.0095 | 0.0094 | 0.0103 | 0.0067 | 0.0052 | 0.0058 | 0.0057 | 0.0099 | 0.0081 | 0.0075 |

续表

| | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| C11 | 0.0069 | 0.0069 | 0.0070 | 0.0129 | 0.0079 | 0.0073 | 0.0065 | 0.0082 | 0.0056 | 0.0041 | 0.0073 |
| C12 | 0.0066 | 0.0070 | 0.0070 | 0.0069 | 0.0080 | 0.0068 | 0.0073 | 0.0108 | 0.0036 | 0.0076 | 0.0072 |
| C13 | 0.0044 | 0.0105 | 0.0086 | 0.0064 | 0.0157 | 0.0081 | 0.0070 | 0.0078 | 0.0068 | 0.0066 | 0.0082 |
| C14 | 0.0085 | 0.0089 | 0.0080 | 0.0090 | 0.0106 | 0.0081 | 0.0093 | 0.0094 | 0.0099 | 0.0124 | 0.0094 |
| C15 | 0.0183 | 0.0119 | 0.0113 | 0.0115 | 0.0119 | 0.0102 | 0.0119 | 0.0102 | 0.0158 | 0.0045 | 0.0118 |
| C16 | 0.0063 | 0.0063 | 0.0061 | 0.0075 | 0.0083 | 0.0058 | 0.0081 | 0.0103 | 0.0087 | 0.0070 | 0.0074 |
| C17 | 0.0344 | 0.0374 | 0.0380 | 0.0377 | 0.0560 | 0.0305 | 0.0336 | 0.0361 | 0.0415 | 0.0448 | 0.0390 |
| C18 | 0.0482 | 0.0414 | 0.0535 | 0.0398 | 0.0449 | 0.0353 | 0.0463 | 0.0435 | 0.0416 | 0.0371 | 0.0432 |
| C19 | 0.0638 | 0.0502 | 0.0518 | 0.0597 | 0.0544 | 0.0423 | 0.0588 | 0.0518 | 0.0801 | 0.0594 | 0.0572 |
| C20 | 0.0586 | 0.0425 | 0.0597 | 0.0482 | 0.0509 | 0.0339 | 0.0554 | 0.0553 | 0.0461 | 0.0398 | 0.0490 |
| C21 | 0.1075 | 0.1246 | 0.1025 | 0.1009 | 0.1433 | 0.1334 | 0.1050 | 0.1503 | 0.1294 | 0.0970 | 0.1194 |
| C22 | 0.0228 | 0.0287 | 0.0227 | 0.0170 | 0.0222 | 0.0153 | 0.0161 | 0.0163 | 0.0259 | 0.0232 | 0.0210 |
| C23 | 0.0228 | 0.0287 | 0.0227 | 0.0170 | 0.0229 | 0.0153 | 0.0161 | 0.0165 | 0.0259 | 0.0232 | 0.0211 |
| C24 | 0.0778 | 0.0781 | 0.0747 | 0.0779 | 0.0667 | 0.0476 | 0.0555 | 0.0595 | 0.0589 | 0.0632 | 0.0660 |
| C25 | 0.0744 | 0.0725 | 0.0750 | 0.0856 | 0.0761 | 0.0533 | 0.0648 | 0.0744 | 0.0727 | 0.0750 | 0.0724 |
| C26 | 0.0783 | 0.0793 | 0.0718 | 0.0750 | 0.0650 | 0.0475 | 0.0253 | 0.0443 | 0.0426 | 0.0507 | 0.0580 |
| C27 | 0.0818 | 0.0787 | 0.0794 | 0.0828 | 0.0688 | 0.0463 | 0.0547 | 0.0625 | 0.0657 | 0.0708 | 0.0692 |

根据表 3，本文选取“四绿”的权重指标并观察其十年来权重的发展趋势，如图 1，可以发现“四绿”的建设权重是从 2016 年开始有明显的上升趋势，“四绿”的评价体系是从 2016 年提出，2017 年开始实施，“四绿”的建设对各地区绿色制造的发展有着重要的影响。

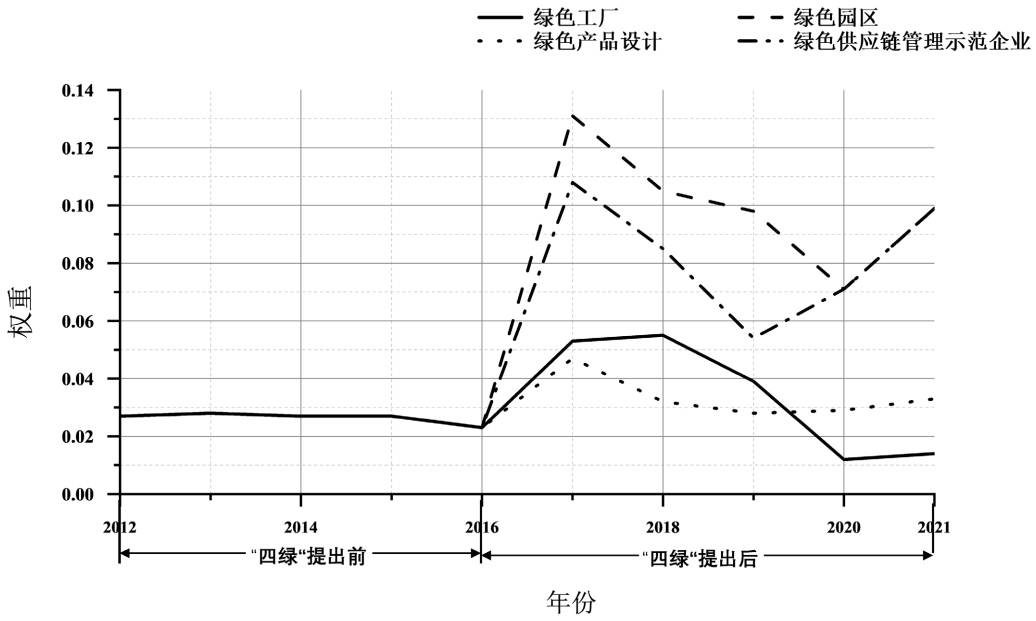



**Figure 1.** “Four greens” weight coefficient
**图 1.** “四绿”权重系数

#### 4.2.2. TOPSIS 评价结果

结合上文的权重结果，结合 TOPSIS 计算，进而得到 2012~2021 年我国 30 个省份固定年份的绿色制造发展水平的综合得分水平及排名见表 4，短期的数据可以在一定程度上避免短视的行为，能够更加合理地反映各地区绿色制造发展水平，由于绿色制造在我国提出的时间段为 2015~2016 年，所以本文将时间分为 2 段，第 1 段时间为 2012~2015 年，第 2 段时间为 2016~2021 年，记为 T1，T2。随后利用这两个时间段的综合评价得分分别作为指标再次进行熵权 TOPSIS 评价，将 2012~2015 年各地区的综合得分看作 6 个指标，便可对 T1 时期进行时空熵权 TOPSIS 分析，同样的 T2 期与其类似，如图 2。

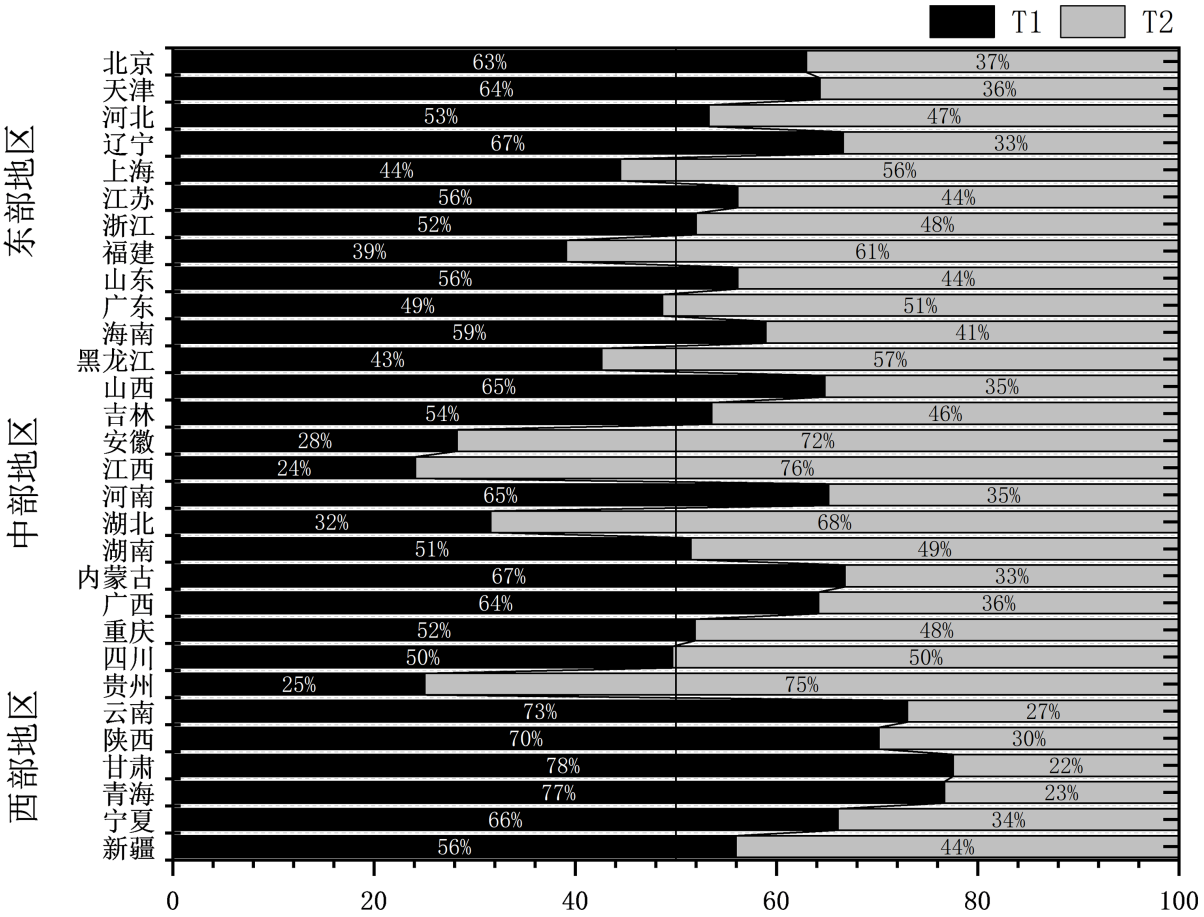



**Figure 2.** T1 and T2 distribution diagram
**图 2.** T1、T2 分布情况图

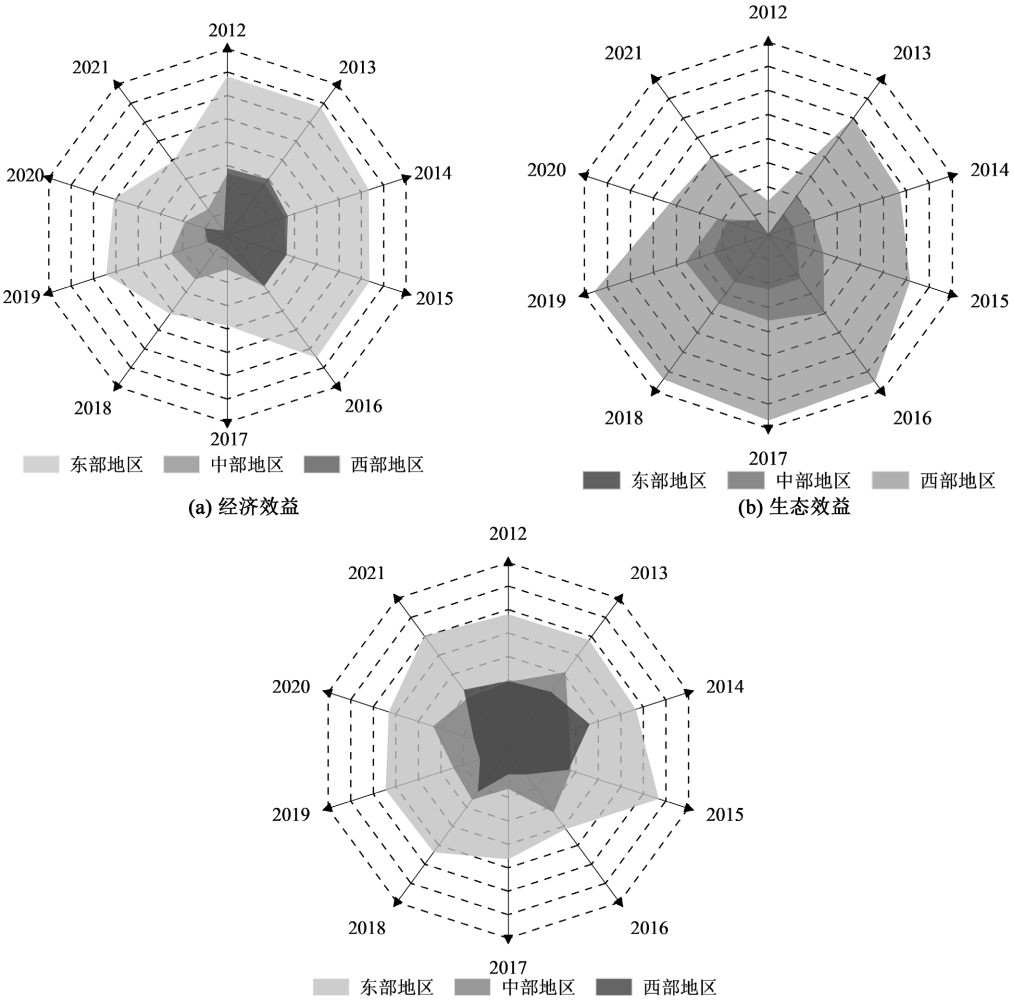
根据表 4，可以发现工业绿色制造水平常年居于高位的省份有广东、山东、江苏、浙江、北京，大多集中于东部地区，分析图 2 可以发现，上海、福建、广东、安徽、江西和湖北六地，在 T2 时期的绿色制造水平高于 T1 时期，绿色制造相关政策的出台对这些省份的绿色发展水平有一定程度上的积极影响，而江苏、浙江、山东等传统强省 T1 和 T2 时期的发展水平波动并不是很明显，但仍居于领先地位，反观其他省份，绿色制造政策的出台，在一定程度上并没有对其绿色制造发展水平有所影响，比如一些西部地区，这些省份经济仍处于快速发展阶段，并且绿色制造的水平历年来普遍偏低，因此本文根据各地区历年绿色制造发展水平的均值及变异系数，来计算研究各地区绿色制造发展水平的发展趋势，如图 3。

**Table 4.** Comprehensive score of green manufacturing level
**表 4.** 绿色制造水平综合得分

| | 省份 | 2012 | 2013 | 2014 | 2015 | 2016 | 2012 | 2013 | 2014 | 2015 | 2016 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 综合得分 | | | | | 排名 | | | | |
| 东部地区 | 北京 | 0.404 | 0.422 | 0.399 | 0.421 | 0.288 | 4 | 6 | 5 | 5 | 6 |
| | 天津 | 0.169 | 0.172 | 0.169 | 0.186 | 0.114 | 18 | 20 | 19 | 13 | 14 |
| | 河北 | 0.200 | 0.205 | 0.251 | 0.204 | 0.126 | 12 | 13 | 9 | 11 | 11 |
| | 辽宁 | 0.171 | 0.184 | 0.174 | 0.282 | 0.088 | 17 | 16 | 17 | 7 | 23 |
| | 上海 | 0.229 | 0.230 | 0.227 | 0.227 | 0.187 | 9 | 10 | 13 | 10 | 10 |
| | 江苏 | 0.519 | 0.616 | 0.479 | 0.545 | 0.381 | 2 | 1 | 1 | 2 | 2 |
| | 浙江 | 0.361 | 0.380 | 0.404 | 0.444 | 0.346 | 6 | 8 | 4 | 4 | 4 |
| | 福建 | 0.213 | 0.269 | 0.245 | 0.278 | 0.244 | 10 | 9 | 10 | 8 | 7 |
| | 山东 | 0.593 | 0.444 | 0.460 | 0.598 | 0.377 | 1 | 3 | 2 | 1 | 3 |
| | 广东 | 0.497 | 0.453 | 0.450 | 0.492 | 0.326 | 3 | 2 | 3 | 3 | 5 |
| | 海南 | 0.111 | 0.111 | 0.108 | 0.112 | 0.081 | 25 | 25 | 26 | 26 | 26 |
| 中部地区 | 黑龙江 | 0.095 | 0.110 | 0.093 | 0.098 | 0.062 | 28 | 26 | 29 | 29 | 29 |
| | 山西 | 0.348 | 0.387 | 0.210 | 0.159 | 0.082 | 7 | 7 | 14 | 20 | 25 |
| | 吉林 | 0.075 | 0.089 | 0.077 | 0.074 | 0.045 | 30 | 30 | 30 | 30 | 30 |
| | 安徽 | 0.159 | 0.173 | 0.159 | 0.174 | 0.217 | 20 | 19 | 20 | 16 | 8 |
| | 江西 | 0.089 | 0.107 | 0.102 | 0.128 | 0.085 | 29 | 29 | 27 | 22 | 24 |
| | 河南 | 0.197 | 0.428 | 0.239 | 0.260 | 0.189 | 13 | 5 | 11 | 9 | 9 |
| | 湖北 | 0.173 | 0.183 | 0.180 | 0.179 | 0.587 | 14 | 17 | 15 | 14 | 1 |
| | 湖南 | 0.168 | 0.185 | 0.157 | 0.168 | 0.104 | 19 | 15 | 21 | 18 | 16 |
| 西部地区 | 内蒙古 | 0.202 | 0.437 | 0.298 | 0.200 | 0.126 | 11 | 4 | 7 | 12 | 12 |
| | 广西 | 0.135 | 0.129 | 0.254 | 0.330 | 0.088 | 21 | 22 | 8 | 6 | 21 |
| | 重庆 | 0.114 | 0.121 | 0.134 | 0.132 | 0.088 | 24 | 24 | 23 | 21 | 22 |
| | 四川 | 0.172 | 0.175 | 0.176 | 0.174 | 0.120 | 15 | 18 | 16 | 17 | 13 |
| | 贵州 | 0.108 | 0.110 | 0.101 | 0.103 | 0.068 | 26 | 27 | 28 | 28 | 28 |
| | 云南 | 0.171 | 0.206 | 0.397 | 0.176 | 0.099 | 16 | 12 | 6 | 15 | 17 |
| | 陕西 | 0.247 | 0.206 | 0.173 | 0.167 | 0.105 | 8 | 11 | 18 | 19 | 15 |
| | 甘肃 | 0.397 | 0.126 | 0.115 | 0.111 | 0.092 | 5 | 23 | 24 | 27 | 19 |
| | 青海 | 0.104 | 0.107 | 0.113 | 0.124 | 0.072 | 27 | 28 | 25 | 24 | 27 |
| | 宁夏 | 0.117 | 0.155 | 0.233 | 0.123 | 0.092 | 23 | 21 | 12 | 25 | 18 |
| | 新疆 | 0.125 | 0.202 | 0.139 | 0.126 | 0.089 | 22 | 14 | 22 | 23 | 20 |

续表

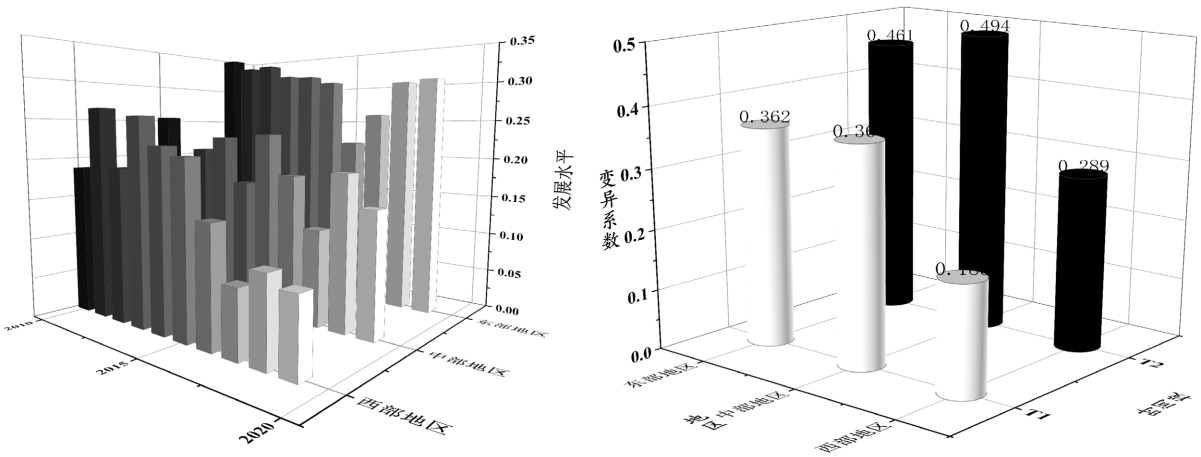
| | 省份 | 2017 | 2018 | 2019 | 2020 | 2021 | 2017 | 2018 | 2019 | 2020 | 2021 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 综合得分 | | | | | 排名 | | | | |
| 东部地区 | 北京 | 0.193 | 0.212 | 0.255 | 0.255 | 0.268 | 7 | 10 | 7 | 7 | 7 |
| | 天津 | 0.076 | 0.078 | 0.087 | 0.086 | 0.076 | 20 | 21 | 18 | 21 | 23 |
| | 河北 | 0.118 | 0.269 | 0.150 | 0.136 | 0.134 | 9 | 7 | 11 | 15 | 16 |
| | 辽宁 | 0.060 | 0.072 | 0.077 | 0.082 | 0.210 | 24 | 22 | 21 | 23 | 9 |
| | 上海 | 0.487 | 0.141 | 0.143 | 0.148 | 0.165 | 2 | 15 | 12 | 11 | 10 |
| | 江苏 | 0.424 | 0.408 | 0.490 | 0.459 | 0.396 | 3 | 4 | 3 | 4 | 3 |
| | 浙江 | 0.210 | 0.366 | 0.362 | 0.397 | 0.483 | 6 | 5 | 5 | 6 | 2 |
| | 福建 | 0.078 | 0.421 | 0.543 | 0.478 | 0.158 | 18 | 2 | 2 | 3 | 12 |
| | 山东 | 0.387 | 0.418 | 0.380 | 0.481 | 0.359 | 4 | 3 | 4 | 2 | 4 |
| | 广东 | 0.523 | 0.585 | 0.630 | 0.506 | 0.690 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| | 海南 | 0.051 | 0.032 | 0.039 | 0.037 | 0.051 | 26 | 29 | 28 | 28 | 28 |
| 中部地区 | 黑龙江 | 0.034 | 0.035 | 0.037 | 0.095 | 0.063 | 29 | 28 | 29 | 19 | 26 |
| | 山西 | 0.087 | 0.183 | 0.242 | 0.153 | 0.103 | 17 | 11 | 8 | 10 | 19 |
| | 吉林 | 0.077 | 0.055 | 0.056 | 0.033 | 0.038 | 19 | 26 | 23 | 29 | 29 |
| | 安徽 | 0.325 | 0.305 | 0.286 | 0.243 | 0.280 | 5 | 6 | 6 | 8 | 6 |
| | 江西 | 0.070 | 0.250 | 0.131 | 0.118 | 0.119 | 21 | 9 | 13 | 17 | 17 |
| | 河南 | 0.109 | 0.162 | 0.174 | 0.137 | 0.138 | 12 | 12 | 9 | 14 | 15 |
| | 湖北 | 0.093 | 0.154 | 0.125 | 0.417 | 0.141 | 15 | 13 | 14 | 5 | 14 |
| | 湖南 | 0.111 | 0.132 | 0.111 | 0.138 | 0.164 | 11 | 16 | 16 | 13 | 11 |
| 西部地区 | 内蒙古 | 0.112 | 0.149 | 0.152 | 0.085 | 0.253 | 10 | 14 | 10 | 22 | 8 |
| | 广西 | 0.049 | 0.260 | 0.056 | 0.062 | 0.075 | 27 | 8 | 24 | 24 | 24 |
| | 重庆 | 0.062 | 0.067 | 0.070 | 0.093 | 0.082 | 23 | 23 | 22 | 20 | 21 |
| | 四川 | 0.126 | 0.131 | 0.124 | 0.170 | 0.151 | 8 | 17 | 15 | 9 | 13 |
| | 贵州 | 0.044 | 0.044 | 0.045 | 0.142 | 0.295 | 28 | 27 | 25 | 12 | 5 |
| | 云南 | 0.053 | 0.124 | 0.083 | 0.121 | 0.074 | 25 | 18 | 19 | 16 | 25 |
| | 陕西 | 0.063 | 0.082 | 0.092 | 0.105 | 0.077 | 22 | 20 | 17 | 18 | 22 |
| | 甘肃 | 0.088 | 0.058 | 0.040 | 0.049 | 0.110 | 16 | 24 | 27 | 27 | 18 |
| | 青海 | 0.014 | 0.030 | 0.032 | 0.031 | 0.018 | 30 | 30 | 30 | 30 | 30 |
| | 宁夏 | 0.103 | 0.056 | 0.045 | 0.050 | 0.056 | 14 | 25 | 26 | 26 | 27 |
| | 新疆 | 0.107 | 0.113 | 0.083 | 0.056 | 0.102 | 13 | 19 | 20 | 25 | 20 |




(a) 经济效益　(b) 生态效益

(c) 社会效益

**Figure 3.** Economic, social, and ecological benefits in various regions
**图 3.** 各地区经济效益、社会效益、生态效益




(a) 绿色制造发展水平均值　(b) 绿色制造发展水平变异系数

**Figure 4.** Mean and coefficient of variation of development levels in various regions over the years
**图 4.** 各地区历年发展水平均值及变异系数

结合图 3 和图 4(a)可知，在绿色发展水平均值上，东部地区、中部地区、西部地区依次递减，我国东部地区的绿色制造发展水平在三个地区中常年是属于领先地位，并且发展相对稳定，这是由于东部地区常年经济效益高，社会发展稳定，有更多的资源来改善环境条件，反馈大自然，而中西部地区虽然具有先天的环境优势，有着很高的生态效益，但是经济发展水平还处于快速发展阶段，生态效益难以转化为经济效益，因此中、西部地区的整体绿色制造水平依旧处于相对较低的水平，由图 4(b)可知，在绿色制造发展水平变异系数上，东、中部地区两个时间段都高于西部地区，但是在 T1 时间段，变异系数值并不是很高，说明三个地区内部绿色制造发展都相对稳定，但是到了 T2 时间段，东、中部地区变异系数变大，说明这个时间段，这两个地区内部绿色制造的发展开始存在不协调、不平衡的问题，然而虽然这两个时间段西部地区的变异系数值很小，发展相对平衡，但是西部地区绿色制造发展水平不充分的基础上的均衡，西部地区绿色制造的发展仍有很大的发展潜力，但是由上文的权重占比发现，经济效益是影响绿色制造的关键因素，但中、西部的经济效益相对于东部地区有很大发展空间，这便要求东部地区在发展绿色制造的过程当中需协调自身各省份发展的同时，对落后地区进行扶持，实现中国工业制造业全面绿色化发展。

#### 4.2.3. 绿色制造发展水平的梯队划分格局分析

本文进一步利用 SOM 神经网络[23]对各地的绿色制造发展的总体水平及分时间维度水平进行聚类分析。结合 SOM 聚类结果将关键年份的总体评价水平划分为 4 个维度(见表 5)，表 5 中的数字代表上所属梯队。

**Table 5.** SOM clustering grouping results
**表 5.** SOM 聚类分组结果

| 东部 | 等级 | | | | 中部 | 等级 | | | | 西部 | 等级 | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 北京 | 2 | 2 | 2 | 2 | 黑龙江 | 4 | 4 | 4 | 4 | 内蒙古 | 3 | 3 | 2 | 3 |
| 天津 | 4 | 4 | 3 | 4 | 山西 | 4 | 4 | 2 | 2 | 广西 | 2 | 3 | 4 | 2 |
| 河北 | 3 | 3 | 2 | 2 | 吉林 | 4 | 4 | 4 | 3 | 重庆 | 4 | 3 | 4 | 4 |
| 辽宁 | 2 | 4 | 2 | 3 | 安徽 | 3 | 2 | 1 | 1 | 四川 | 4 | 2 | 3 | 3 |
| 上海 | 3 | 3 | 1 | 3 | 江西 | 3 | 4 | 4 | 2 | 贵州 | 4 | 2 | 4 | 4 |
| 江苏 | 1 | 1 | 1 | 1 | 河南 | 2 | 2 | 3 | 3 | 云南 | 3 | 3 | 4 | 3 |
| 浙江 | 2 | 2 | 2 | 1 | 湖北 | 2 | 1 | 3 | 2 | 陕西 | 4 | 3 | 4 | 4 |
| 福建 | 2 | 2 | 4 | 1 | 湖南 | 2 | 3 | 3 | 3 | 甘肃 | 4 | 3 | 3 | 4 |
| 山东 | 1 | 1 | 1 | 1 | | | | | | 青海 | 2 | 4 | 4 | 4 |
| 广东 | 2 | 2 | 1 | 1 | | | | | | 宁夏 | 3 | 3 | 3 | 4 |
| 海南 | 2 | 3 | 4 | 4 | | | | | | 新疆 | 4 | 3 | 3 | 3 |

这部分选取了 2015~2018 四个关键年份，涵盖了绿色制造提出并开始实施的关键年份，根据表 5 和图 5 可知，我国的绿色制造水平第一梯队的省份比较集中于东部地区，比如江苏、山东、广东等地，并且数量逐年增多，东部第四梯队的省份逐年减少，而对于中、西部地区，第四梯队的省份较多，但是对于东部地区，2016 年以后，第四梯队的省份逐渐减少，更是在 2016~2018 年期间，出现了两个第一梯队的省份，2017~2018 年的安徽，在这两年，安徽省十分注重“四绿”的建设，分别在 2017 年成立了 54 家绿色工厂、1 个绿色园区，在 2018 年成立了 116 家绿色工厂和 6 个绿色园区仅此于东部地区的山东和

广东，成功跻身为第一梯队，其次就是 2016 年的湖北，在这一年，湖北投入大量的绿色治理费用，一度跻身第一梯队，然而对于西部地区，虽然，天然生态环境的优益维绿色制造的提供了很好的条件，并且云贵川等地也纷纷加强了“四绿”的建设，但是常年的经济基础落后，人才吸引力和创新能力不足，导致其仍是第四梯队的重灾区。

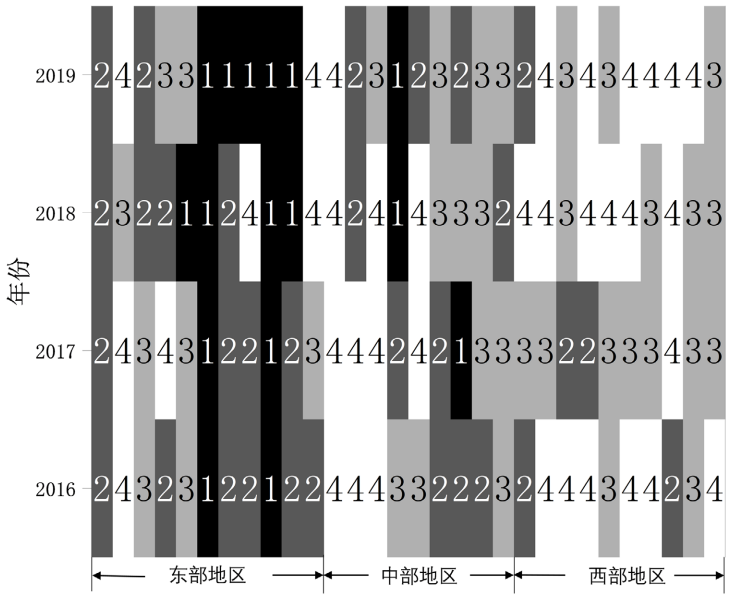



**Figure 5.** SOM cluster analysis chart
**图 5.** SOM 聚类分析图

## 5. 结论与建议

本研究通过构建时序熵权 TOPSIS 模型，对我国 30 个省份的绿色制造发展指数进行了深度评估。在宏观层面，运用 SOM 神经网络聚类法对各省绿色制造发展水平进行分类分析，同时在更大的空间范围内，对东、中、西三大地区的绿色制造时空演变规律进行了深入探索。研究结果揭示了几个关键发现：首先，东部地区一直保持较高水平的绿色制造发展，而中西部地区的水平相对较低，其中绿色成果是影响地区绿色制造发展水平的主导因素。其次，2012~2015 年期间，无论是东部还是中西部地区，绿色制造发展指数普遍下降，直到 2016 年，“绿色制造”概念的提出及相关行动的实施扭转了这一趋势，从而缓解了经济发展与环境保护之间的矛盾。最后，本研究将各省份历年绿色制造发展水平分为四个梯队，尽管第一梯队省份数量逐年增加，但第四梯队省份数量依然较高，主要分布在中西部，特别是西部地区，突显中西部绿色制造发展水平不足的问题。

在推动制造业高质量发展的大背景下，为实施绿色制造，各区域应集中精力解决技术、生命周期、信息化和智能化等方面的问题。首先，需加速制定节能减排技术标准，不断完善绿色制造标准体系，特别强调“四绿”建设。其次，强调贯穿产品生命周期的绿色制造理念，包括引入清洁生产技术、广泛推广清洁能源的使用，以及生产绿色设计的产品。在此基础上，提升信息化和智能化生产水平，以提高整体生产效率。在区域层面，强调协同合作，促使各方共同致力于绿色制造的实践。政策层面应提供全面支持，鼓励企业进行绿色技术研发和应用，并推动最佳实践和经验的共享，以推动整个区域制造业的全面升级。

为大力提高企业绿色制造发展水平，我们提出其云制造资源优化配置的四点相关管理建议如下：(1)

利用云制造技术实时收集、分析和处理云制造生产数据，以深入了解云制造企业资源利用情况和生产效率，并且识别潜在的资源浪费和能源消耗高峰，制定相应的云制造资源优化配置的合理方案。根据所分析数据建立其智能预测模型，预测云制造资源需求，避免云制造企业资源短缺或过剩，并及时调整资源计划以最大程度地提高云制造企业资源共享，以减少其资源浪费。(2) 利用云制造虚拟化技术，建立虚拟生产环境和模拟生产线。其主要是通过虚拟仿真，优化生产工艺和流程，降低资源与能源消耗及废物产生。云制造企业在虚拟环境中测试不同的生产方案，评估其对环境的影响，并选择最优方案进行实际生产，从而减少资源试错成本。从而能有效的提高云制造企业所在区域的生态效益水平。(3) 利用云制造平台建立生产资源共享网络，实现企业间和跨行业的资源共享和合作，实现生产过程的协同优化，提高生产效率和质量。并且利用云计算技术实现对云制造企业资源的数据分析和预测，优化物流运输路径，降低运输成本和碳排放。其有效提高企业所在区域地环境与经济效益水平。(4) 通过降低制造企业的碳排放和减少资源消耗，企业可以为环境保护作出贡献，减少对生态环境的破坏，改善资源环境质量，提高居民生活质量。并且通过提高云制造企业的资源配置效率，促进了社会、环境效益的提高。通过以上云制造资源优化配置的相关建议，可有效提高企业所在区域绿色制造发展水平，并且推动整个云制造企业群向绿色化转型发展。

## 基金项目

国家自然科学基金项目(编号：72261005)；贵州省省级科技计划项目(编号：黔科合基础-ZK [2021]一般339)，贵州省省级科技计划项目(编号：黔科合基础-ZK [2022]一般080)；贵州大学研究基地及智库重点专项课题(编号：GDZX2021031)。

## 参考文献

[1] Weissman, S.H. and Sekutowski, J.C. (1991) Environmentally Conscious Manufacturing: A Technology for the Nineties. *AT & T Technical Journal*, **70**, 23-30. https://doi.org/10.1002/j.1538-7305.1991.tb00134.x

[2] Sarkis, J. (2001) Manufacturing's Role in Corporate Environmental Sustainability—Concerns for the New Millennium. *International Journal of Operations & Production Management*, **21**, 666-686. https://doi.org/10.1108/01443570110390390

[3] 陈艳莹, 于千惠, 刘经珂. 绿色产业政策能与资本市场有效"联动"吗——来自绿色工厂评定的证据[J]. 中国工业经济, 2022(12): 89-107.

[4] 杨俊峰, 张添硕, 周长波, 凌黎明, 王曦. "双碳"目标背景下我国绿色制造体系建设路径研究[J]. 中国环境管理, 2022, 14(6): 75-80.

[5] 李金华. 中国绿色制造、智能制造发展现状与未来路径[J]. 经济与管理研究, 2022, 43(6): 3-12.

[6] 曹裕, 李想, 胡韩莉, 万光羽, 汪寿阳. 数字化如何推动制造企业绿色转型?——资源编排理论视角下的探索性案例研究[J]. 管理世界, 2023, 39(3): 96-112, 126, 113.

[7] Salem, A.H. and Deif, A.M. (2017) Developing a Greenometer for Green Manufacturing Assessment. *Journal of Cleaner Production*, **154**, 413-423. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.03.196

[8] 林志炳, 陈莫凡, 李钰雯. 考虑绿色制造及企业社会责任行为的零售商自有品牌策略研究[J]. 管理工程学报, 2023, 37(1): 216-224.

[9] 邵帅, 范美婷, 杨莉莉. 经济结构调整、绿色技术进步与中国低碳转型发展——基于总体技术前沿和空间溢出效应视角的经验考察[J]. 管理世界, 2022, 38(2): 46-69, 4-10.

[10] 游建民, 张伟. 国家生态文明试验区绿色制造绩效评价及影响因素研究——以贵州为例[J]. 贵州社会科学, 2018(12): 120-128.

[11] 李志鹏, 欧阳玉凤, 杨浩昌. 区域绿色制造发展指数测度及其时空演变特征分析[J]. 统计与决策, 2022, 38(20): 11-15.

[12] 王鸣涛, 叶春明. 基于熵权 TOPSIS 的区域工业绿色制造水平评价研究[J]. 科技管理研究, 2020, 40(17): 53-60.

[13] 黄晓杏, 余达锦, 刘亦晴. 区域绿色创新系统成熟度指标体系的构建与评价[J]. 统计与决策, 2019, 35(21): 45-49.

[14] Valenzuela-Venegas, G., Salgado, J.C. and Díaz-Alvarado, F.A. (2016) Sustainability Indicators for the Assessment of Eco-Industrial Parks: Classification and Criteria for Selection. *Journal of Cleaner Production*, **133**, 99-116. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.05.113

[15] 魏艳华, 王丙参, 朱琳. 基于时空熵权 TOPSIS 评价法的经济高质量发展水平测度——以广东省为例[J]. 统计与决策, 2023, 39(8): 91-95.

[16] 中国工程院绿色制造发展战略研究课题组. 推进绿色制造 建设生态文明——中国绿色制造战略研究[J]. 中国工程科学, 2017, 19(3): 53-60.

[17] 陶永, 李秋实, 赵罡. 面向产品全生命周期的绿色制造策略[J]. 中国科技论坛, 2016(9): 58-64.

[18] 钟玥, 陈伟栋. “工业工程 + 绿色制造”战略研究体系的构建[J]. 中国管理信息化, 2018, 21(23): 131-134.

[19] 汪凌, 邹建辉, 刘淑敏. 中国绿色经济发展水平测度、动态演进及空间效应研究[J]. 统计与决策, 2023, 39(18): 97-102.

[20] 明翠琴, 陈雷, 钟书华. 中国绿色增长综合评价指标体系的构建及实证[J]. 科技管理研究, 2021, 41(10): 76-86.

[21] 王曰芬, 徐天傲, 岑咏华. 绿色发展理念支撑的生态文明建设综合评价指标体系构建及应用[J]. 智库理论与实践, 2023, 8(4): 52-63.

[22] 李晔, 陈奕延, 李群. 中国城市群绿色发展水平测度与效率评价[J]. 统计与决策, 2023, 39(17): 126-131.

[23] 朱梦菲, 陈守明, 邵悦心. 基于 AHP-TOPSIS 和 SOM 聚类的区域创新策源能力评价[J]. 科研管理, 2020, 41(2): 40-50.