

通过图模型衡量优先级的方法:谁是前 1 名?

摘要: 2015 年, 联合国制定了 17 项可持续发展目标(sdg)。如果这些目标得以实现, 我们最终可以改善全世界人民的生活。17 个可持续发展目标并不是相互独立的。它们之间的联系使所有目标的实现变得更加容易。在本文中, 我们构建了三个不同的模型来研究如何优先考虑可持续发展目标。

首先, 为了找出 17 个可持续发展目标之间的关系和优先级, 我们提出了关系图模型。在模型中, 我们在 17 个可持续发展目标之间建立了一个图表。图的顶点是这 17 个目标。图的边缘是通过 Spearman 相关分析算法得出的目标之间的相关性。为了测量图, 我们使用了中间中心性 (Betweenness Centrality)、接近中心性 (Closeness Centrality) 和特征向量中心性 (Eigenvector Centrality)。我们分别计算正边和负边的中心性。因此, 每个目标有 6 个指标。我们使用熵权法来计算这 6 个指标的权重。然后我们使用加权 TOPSIS 来得到 17 个目标的优先级。目标 3 和目标 4 在我们研究的所有三个国家的优先级列表中排名前 5 位。这意味着大多数国家应将卫生和教育列入发展的优先清单。

然后, 我们研究了 17 个可持续发展目标在未来 10 年的发展。我们提出了时间香槟塔模型。该模型不仅考虑了基于优先级的资源分配, 还考虑了目标之间的协同和权衡关系。我们使用时间序列算法预测未来 10 年可持续发展目标的发展。我们按照优先满足高优先级目标的方法来分配资源。当一个目标实现时, 我们将其优先级提升到最高优先级队列(完整目标队列), 优先维护完整目标。我们对印尼进行模拟。未来 10 年, 印尼可以实现 5 个目标。中国可以实现 82%的可持续发展目标, 比目前计划的结果高出 4%。

此外, 为了研究 COVID-19 等突发事件的影响, 我们对模型进行了一些调整。我们增加了两个参数来衡量影响。关于优先级和分配资源的模型根据这两个参数进行调整。我们重新运行我们的模型。根据模拟, 未来 10 年, 印尼只能实现 3 个目标。它可以实现 78%的可持续发展目标, 比之前的结果低 4%。

最后, 我们对时间香槟塔模型的超参数进行了敏感性分析。的变化所引起的模型的最大变化范围和分别为 0.041 和 0.028, 说明我们的模型具有较强的稳健性。

关键词:可持续发展目标, 图中心性, topsis, 熵权法

目录

通过图模型衡量优先级的方法:谁是前 1 名?.....1

1 介绍 4

 1.1 问题背景4

 1.2 文献综述4

 1.3 我们的工作 4

2 假设和理由 5

3 符号 5

4 关系图模型6

 4.1 数据 6

 4.1.1 数据选择 6

 4.1.2 数据处理 6

 4.2 图的构建7

 4.3 基于图论的图度量8

 4.4 结果与分析 8

 4.4.1 图中的结果和分析8

 4.4.2 来自图参数的结果和分析 10

5 优先级模型 10

 5.1 模型的建立 11

 5.1.1 子模型 1:权熵法模型 11

 5.1.2 子模型 2:TOPSIS 模型 12

 5.2 结果与分析 12

6 未来发展的时间香槟塔模型 13

 6.1 模型的数学建立 14

 6.2 时间香槟塔模型 15

 6.3 基于时间序列算法的模型解决方案 15

 6.4 实现一个目标 16

 6.5 结果与分析 16

7 影响分析 17

 7.1 COVID-19 对模型的影响 17

 7.2 结果与分析 18

 7.3 模型对公司和组织的影响 18

8 敏感性分析 19

9 模型评价和进一步讨论 20

9.1 模型的优势 20

9.2 模型的不足 20

参考文献 21

附录 22

1 介绍

1.1 问题背景

1987 年，布伦特兰报告提出了最被认可的可持续发展定义，即：“可持续发展是能够满足当代人的要求，而不必消耗后代人的能力”[1]。此后，针对这一目标进行了多次尝试[2]。2015 年，联合国制定了 17 项可持续发展目标(SDGs)[3]。如果这些目标得以实现，将最终改善全世界人民的生活。

17 个 SDGs 并不是相互独立的。它们之间的联系使所有目标的实现变得更加容易。因此，我们建立模型来研究它们之间的关系，并完成以下问题。

创建一个网络，揭示 17 个 SDGs 之间的关系。这个问题的关键是用数学的方式来衡量这些关系。

为 17 个 SDGs 设定优先级。这个问题的关键是找到一个合理的标准，并在这个标准下对所有目标进行分类。

研究未来 10 年 SDGs 的发展，确定优先事项。研究实现一个目标的影响。这个问题的关键是找到一个考虑到优先级和目标之间关系的计划。

讨论意外事件的影响。这个问题的关键是量化影响，并根据影响调整我们的模型。

讨论模型在其他领域的使用。这个问题的关键是找到 SDGs 与公司和组织目标之间的关系。

1.2 文献综述

SDGs 之间的关系已被广泛研究。David Le Blanc 根据指标与目标之间的关系，提出了 SDG 关系图[4]。他的结论是，一些 SDGs 是密切相关的。Ranjula Bali Swain 等人利用 SDG 目标变量之间的相关性对相关网络中的边缘进行建模[5]。他们使用中心性度量和社区检测来分析网络。他们的结论是，为特定地区确定 SDG 目标的特定群体可能是有效的。Pradhan P, Costa L, Rybski D 等人计算了指标之间的 Spearman 相关性，并将相关性分类为协同和权衡。他们强调协同作用在实现 SDGs 中的作用[6]。上述工作均采用相关性来衡量 SDGs 之间的关系，取得了良好的效果。

Naidoo R, Fisher B 讨论了 COVID-19 对可持续发展目标的威胁，并表达了对联合国的期望[7]。Mukarram M 描述了 COVID-19 的社会经济影响，这些影响可以通过他的方法减轻[8]。两部作品都很好地评估了全球流行病的影响。我们在他们的研究基础上进一步讨论。

1.3 我们的工作

在问题分析的基础上，我们构建了三个有特色的模型——关系图模型、优先级模型和时间香槟模型。然后我们研究了 COVID-19 对我们模型的影响。最后，我们进行敏感性测试，以检验模型的稳健性。我们所做的工作主要如图 1 所示。

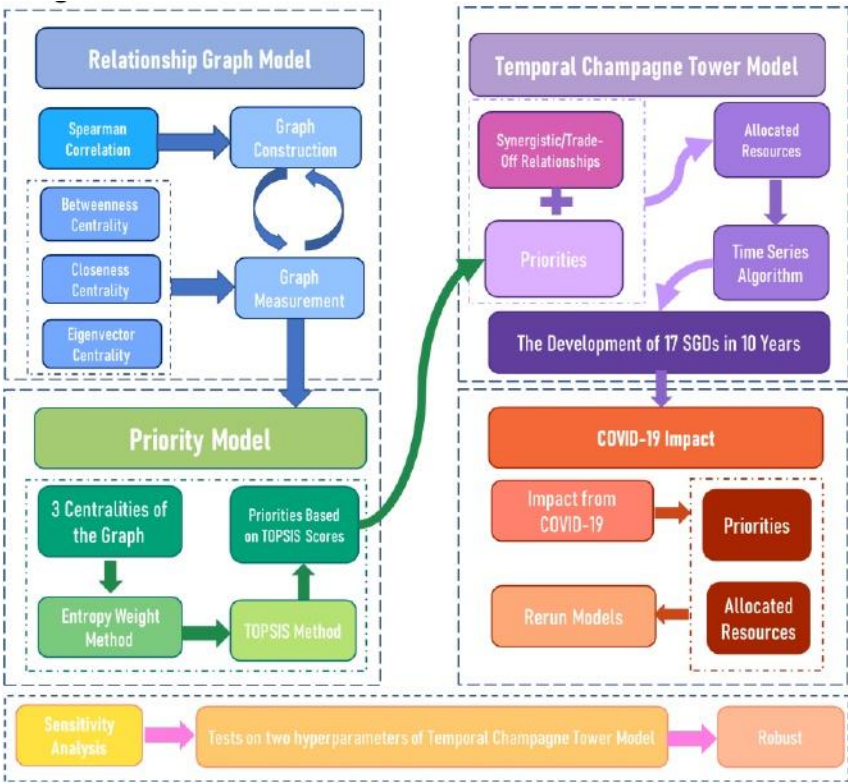


图 1 我们的工作框架

2 假设和理由

通过对问题的完整分析，为了使我们的模型更加实用合理，我们做出了以下合理的假设。

假设 1:来自数据集的所有数据都是真实的。

研究假数据集是没有意义的。我们相信我们得到的数据集是真实准确的。从未发生过恶意修改。

假设 2:所有 17 个可持续发展目标的完成难度是相同的。

由于很难衡量每个目标的完成难度，也没有找到描述难度的具体数据，我们假设它们的完成难度都是相同的。

3 符号

本文使用的关键数学符号列于表 1。

表 1 本文中使用的符号

Symbol	Definition
$\mathcal{G}(V,E,W)$	The undirected relationship graph of 17 SGDs.
$BC(i)$	The betweenness centrality of node i .
$CC(i)$	The closeness centrality of node i .
$EC(i)$	The eigenvector centrality of node i .
s_i	The score of the i^{th} goal from TOPSIS Model.
$v_t(i)$	Change of percentage complete from correlation.
$d_t(i)$	Resources allocated to the i^{th} goal.
$g_t(i)$	Percentage complete of the i^{th} goal in year t .
γ_i	The threat level of the goal i .
MI_i	The mitigation or aggravating level of the goal i .

注:这里有一些变量没有列出来，将在每一节详细讨论。

4 关系图模型

为了揭示 17 个可持续发展目标之间的关系，我们基于图论创建了一个图。之后，我们想要衡量图中每个节点的重要性，这对于研究 17 个目标的优先级起着重要的作用。因此，我们使用三种类型的中心性度量作为我们图模型的参数，这三种度量通常用于告诉节点的重要性。

4.1 数据

在模型建立之前，我们首先得到需要的数据。然后我们对数据做一些预处理，以便更好的分析。

4.1.1 数据选择

我们的数据来自联合国全球可持续发展目标数据库[9]。该数据库拥有跟踪 17 个可持续发展目标的综合数据集。17 项可持续发展目标各有若干具体目标。每个目标也有几个指标。每个指标又由多个系列组成。

为了使我们的模型更加可靠和稳健，我们在最大化样本年份和系列数量之间做了一个平衡。我们还必须确保涵盖所有可持续发展目标。最后，我们一共选择了 95 个系列。我们选择来自土耳其、墨西哥和印度尼西亚的数据，这三个国家代表了三个不同的大洲。数据年份为 2003 年至 2018 年。

4.1.2 数据处理

数据清洗:数据集中丢失了一些值。我们使用线性回归来补充缺失的值。这种方法可以尽可能地利用原始数据集中的信息。其计算方法为

$$\begin{aligned} \hat{y} &= bx + a \\ b &= \frac{n \sum_{i=1}^n x_i y_i - \left(\sum_{i=1}^n x_i\right) \left(\sum_{i=1}^n y_i\right)}{n \sum_{i=1}^n x_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n x_i\right)^2} \\ a &= \bar{y} - b\bar{x} \end{aligned} \tag{1}$$

其中 \hat{y} 为缺失项的补充值， x 为缺失项的年份， a, b 为两个参数。对于 $\hat{y} < 0$ ，我们用 0 来补充缺失。

数据归一化：我们进行归一化，使数据被限制在[0,1]内部，以减少奇异样本数据造成的不良影响。对于那些越大越好的指标，我们是这样进行规范化的

$$I'_{i,t,c} = \frac{I_{i,t,c} - \min(I_{i,\cdot,\cdot})}{\max(I_{i,\cdot,\cdot}) - \min(I_{i,\cdot,\cdot})} \quad (2)$$

其中 $I_{i,t,c}$ 为 t 周期 c 国家 i 系列矩阵， $I'_{i,t,c}$ 为标准化后的值。

对于越小越好的指标，我们就这样进行规范化：

$$I'_{i,t,c} = \frac{\max(I_{i,\cdot,\cdot}) - I_{i,t,c}}{\max(I_{i,\cdot,\cdot}) - \min(I_{i,\cdot,\cdot})} \quad (3)$$

归一化后，我们使所有指标越大越好，并限制在[0,1]。这使得它在计算数据的相关性时更加合理。

4.2 图的构建

我们用 $\mathcal{G}(V, E, W)$ 来表示 17 个目标的无向关系图，其中 V 是所有节点的集合， E 是所有边的集合， W 是权值矩阵。 V_i 是第 i 个节点，代表第 i 个目标。 E_{ij} 是 i 节点和 j 节点之间的无向边，表示两个目标之间的连接。 w_{ij} 是指 E_{ij} 的重量。根据数据的结构和问题 1 的要求，我们将“目标”直接关注“系列”。然后我们用 V_{ik} 来表示第 i 个目标的第 k 个级数。我们用来表示第 x_{ik} 个目标的第 k 个级数的向量。它包括了 2003 年至 2018 年的数据。向量 x_{ik} 可以被描述为

$$x_{ik} = [x_{ik1}, x_{ik2}, \dots, x_{ik16}]^T \quad (4)$$

其中 $x_{ik1}, x_{ik2}, \dots, x_{ikn}$ 为 2003-2018 年第 i 个目标的第 k 个系列的统计值。它们来自于我们找到的数据集。

我们使用斯皮尔曼的分析来构造图的边。这是因为与皮尔逊的相关分析相比，斯皮尔曼的分析更善于捕捉非线性相关，而且更少对离群值敏感[10]。我们用 $b_{ik,jp}$ 来表示第 i 个目标的第 k 个级数和第 j 个目标的第 p 个级数之间的斯皮尔曼相关系数。在计算之前，我们需要将其转换为等级向量和（数字的等级是数字的向量从小到大排序后的位置）。然后，我们计算了相关系数 $b_{ik,jp}$ 的计算方法为

$$b_{ik,jp} = \frac{\frac{1}{n} \sum_{m=1}^n (r_{ikm} - \bar{r}_{ik}) \cdot (r_{jpm} - \bar{r}_{jp})}{\sqrt{\left(\frac{1}{n} \sum_{m=1}^n (r_{ikm} - \bar{r}_{ik})^2 \right) \cdot \left(\frac{1}{n} \sum_{m=1}^n (r_{jpm} - \bar{r}_{jp})^2 \right)}} \quad (5)$$

其中 \bar{r}_{ik} 和 \bar{r}_{jp} 分别为所有 r_{ik} 和 r_{jp} 的平均值。

序列之间的联系主要可以分为三种类型，分别是正相关、负相关和无相关。第 i 个目标系列和第 j 个目标系列之间的所有联系可能不属于同一类型。因此，我们分别考虑这三种类型的连接。我们用向量 a_{ij} 来衡量第 i 个目标和第 j 个目标之间的联系。 a_{ij} 向量的第一个维度衡量的是正相关。向量的第二维测量负相关，向量的第三维测量无相关。 a_{ij} 的计算方法为

$$a_{ij} = \begin{bmatrix} \frac{crad(\{b_{ik,jp} | b_{ik,jp} > 0.6\})}{N_{ij}} \\ \frac{crad(\{b_{ik,jp} | b_{ik,jp} < -0.6\})}{N_{ij}} \\ \frac{crad(\{b_{ik,jp} | -0.6 \leq b_{ik,jp} \leq 0.6\})}{N_{ij}} \end{bmatrix} \quad (6)$$

其中 N_{ij} 为第 i 个目标系列与第 j 个目标系列之间的连接总数。如果 $N_{ij} < 10$ ，节点 i 和节点 j 之间的边将被删除。因为相关性不是可靠的[6]。

最后，计算了 E_{ij} 边缘的权值 w_{ij}

$$w_{ij} = a_{ij1} - a_{ij2} \quad (7)$$

如果 $w_{ij} > 0$ ，那么第 i 个目标与第 j 个目标呈正相关。如果 $w_{ij} < 0$ ，那么第 i 个目标与第 j 个目标呈负相关。 w_{ij} 相关性越大，就越强。

4.3 基于图论的图度量

度量节点影响的方法主要有三种。因此，我们的模型参数来自这三种方法，即中间性中心性、接近性中心性和特征向量中心性。这里我们分别考虑了正边和负边。

中间性中心性

中间性中心性衡量一个节点在其他节点路径上的频率[11]。我们用 $BC(i)$ 来表示 i 节点的中间性中心性。其计算方法为

$$BC(i) = \sum_{\substack{j < k \\ j \neq i \neq k}} \frac{n_i(j,k)}{n(j,k)} \quad (8)$$

其中 $n(j,k)$ 为从节点 j 到节点 k 的最短路径数， $n_i(j,k)$ 为通过节点 i 的路径数。

亲近中心性

如果一个节点与其他节点的最小距离之和很小，则该节点与其他节点接近[12]。亲密中心性是一种基于路径的中心性方法[5]。我们用 $CC(i)$ 来表示第 i 节点的接近中心性，他的计算方法是。

$$CC(i) = \frac{1}{\sum_{j \neq i} d(i,j)} \quad (9)$$

其中 $d(i,j)$ 为 i 节点与 j 节点之间的最小距离。

特征向量中心性

特征向量中心性是衡量节点[13]重要性的一种常用算法。它考虑了邻居的数量和邻居的重要性。我们用来表示第 i 个节点的特征向量中心性。它的计算方法是：

$$EC(i) = \alpha \sum_{j=1}^n r_{ij} \cdot EC(j) \quad (10)$$

其中 $1/\alpha$ 为邻接矩阵 $R = (r_{ij})$ 的最大特征值。

4.4 结果与分析

4.4.1 图中的结果和分析

图 2 是三个国家 17 个目标之间的关系图。图 2 中，红线代表正相关，蓝线代表负相关。线越粗，相关性越强。根据图 2，我们有了一些发现：

总的来说，17 个进球中，大多数都是相互正相关的。正相关代表协同关系，负相关则代表权衡关系。根据联合国的说法，这 17 个目标具有相同的目的，即消除贫困，保护地球，确保所有人的繁荣。这样一来，17 个目标之间就应该具有协同关系。

确实存在一些负相关，也就是说这两个目标是权衡取舍的。这主要是因为这两个目标是相互竞争的资源。

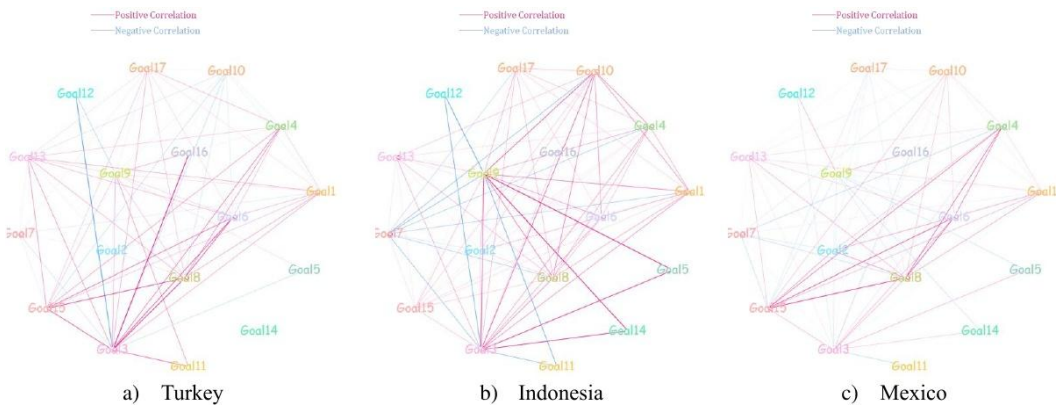


图 2 17 个目标之间的关系图

图 3 显示了印度尼西亚 17 个可持续发展目标内部和之间的协同效应和权衡。左图部分显示了目标内部的协同效应和权衡。中间部分显示了目标之间的协同作用和权衡。右边部分显示了图的颜色条和图例。图的下方三角形部分是几个饼状图。这些饼图描述了两个目标之间正相关、负相关和不相关的百分比。这是因为每个进球都有很多序列。一系列目标之间的所有连接可能不属于同一类型。图中上方的三角形部分是两个进球之间的权重。根据图 3，我们有了一些发现：

在每个目标内，正相关大于负相关。每个目标的序列都是协同效应。这意味着为每个目标设定的目标都是合理的。

目标 7 与所有其他目标呈负相关。目标 7 是“负担得起的清洁能源”。清洁能源的成本远高于化石能源。而且它需要大量的投资来进行技术改进。也占用了大量的人力物力。目标 7 和其他目标之间的取舍也就说得通了。

给联合国的建议。我们建议联合国降低目标 7 的标准

像印尼这样综合国力不强的国家。我们也建议这些国家把目标 7 放在低优先级。此外，让一些发达国家帮助这些国家开发负担得起的清洁能源技术也是一个好主意。

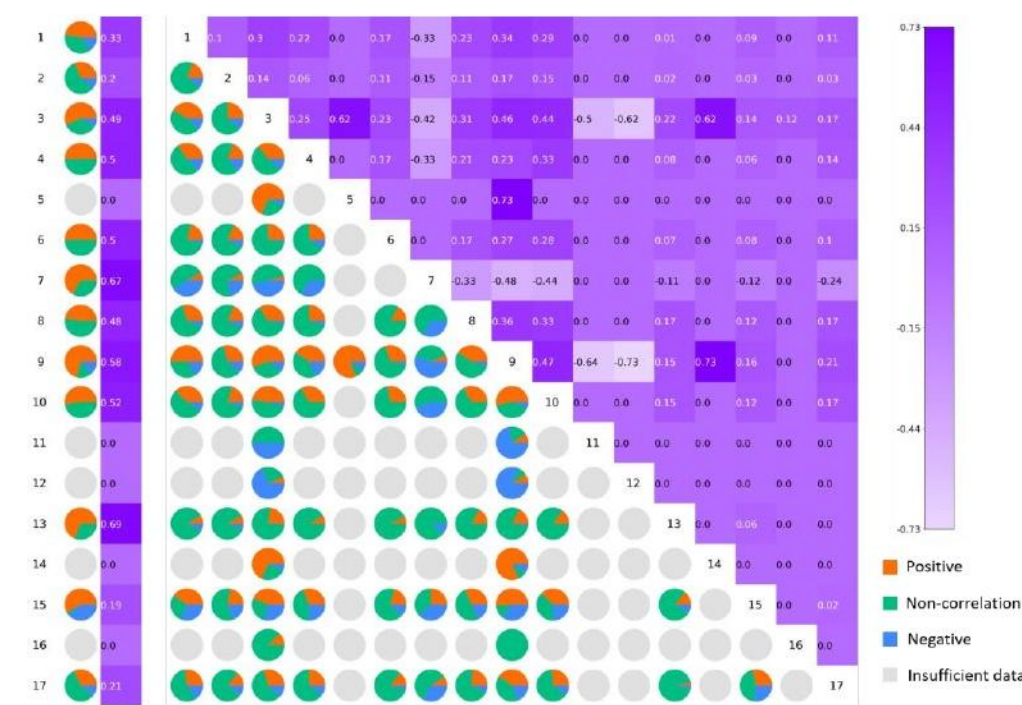


图 3 目标内部和目标之间的协同效应和权衡

4.4.2 来自图参数的结果和分析

由于我们分别考虑了正边和负边，所以我们有两种中心性。我们用 BC^+ ， CC^+ ， EC^+ 分别表示正边的中间性中心性、接近中心性和特征向量中心性。我们使用 BC^- ， CC^- ， EC^- 别表示负边的中间性中心性、接近中心性和特征向量中心性。墨西哥图表的参数如表 2 所示。印度尼西亚和土耳其的图表参数见附录。根据表中，我们发现目标 3 的值最高 BC^+ ， CC^+ ， EC^+ 。我们初步估计目标 3 的最高优先级。第 5 节将对优先事项进行进一步的研究

表 2 墨西哥图参数

	Goal 1	Goal 2	Goal 3	Goal 4	Goal 5	Goal 6	Goal 7	Goal 8
BC^+	0.000	0.004	0.162	0.004	0.000	0.004	0.000	0.004
CC^+	0.444	0.556	0.606	0.556	0.333	0.556	0.000	0.556
EC^+	0.340	0.313	0.340	0.036	0.340	0.000	0.340	0.000
BC^-	0.022	0.196	0.252	0.000	0.000	0.000	0.046	0.000
CC^-	0.520	0.722	0.619	0.464	0.394	0.481	0.481	0.481
EC^-	0.257	0.472	0.294	0.108	0.062	0.209	0.226	0.209

表 2 墨西哥图参数(续)

Goal 9	Goal 10	Goal 11	Goal 12	Goal 13	Goal 14	Goal 15	Goal 16	Goal 17
0.029	0.004	0.000	0.000	0.004	0.000	0.004	0.000	0.000
0.200	0.556	0.000	0.120	0.556	0.333	0.556	0.120	0.120
0.340	0.000	0.000	0.340	0.036	0.340	0.000	0.000	0.340
0.054	0.491	0.000	0.010	0.022	0.000	0.022	0.000	0.000
0.520	0.813	0.000	0.419	0.520	0.000	0.520	0.000	0.464
0.232	0.510	0.000	0.112	0.257	0.000	0.257	0.000	0.108

5 优先级模型

如图 4 所示，基于 4.4 节的结果，每个目标现在有三个属性，这是节点的三个中心性度量。由于我们分别考虑了正边和负边，所以每个属性有 2 个指标。因此，每个目标有 6 个指标。然后利用熵权法(EWM)确定各指标的权重。之后，我们使用加权 TOP- SIS[14]来获得所有 17 个目标的得分。17 个目标的优先级是基于这些分数。分数越高，优先级越高。

在图论中，中心性度量用于评估图中节点的“中心性”状态。它有助于理解图中节点的重要性和影响力。在我们的关系图模型中，中心性越高的目标意味着它更重要，拥有更大的影响力。因此，这个目标应该具有更高的优先级。将熵权法与 TOPSIS 相结合，可以得到更可靠、更全面的中心性度量。因此，基于我们模型的优先级可以是有效的。

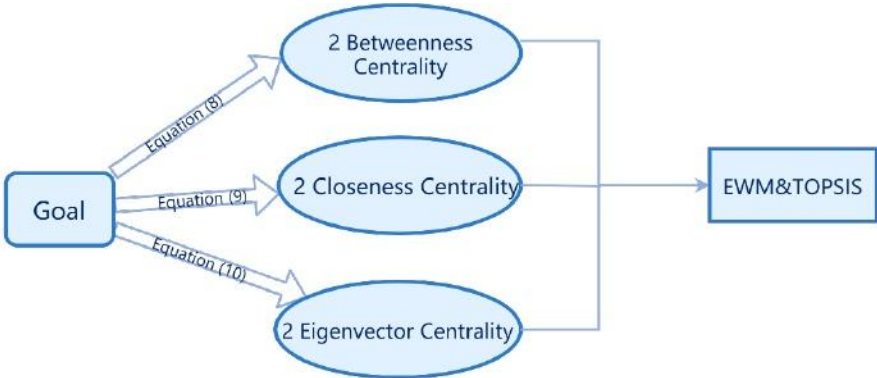


图 4 优先级模型概述

5.1 模型的建立

我们首先对向量 BC⁺, CC⁺, EC⁺ 进行积极的管理，因为它们是负边缘的中心点。

然后，我们将第 i 个目标的六个索引组合成一个向量。它可以被描述为

$$c_i = [BC_i^+, CC_i^+, EC_i^+, BC_i^-, CC_i^-, EC_i^-]^T \quad (11)$$

然后，我们将所有 17 个目标合并成一个 17*6 矩阵 C。因此，C 是

$$C = [c_1, c_2 \dots c_{17}]^T \quad (12)$$

5.1.1 子模型 1: 熵权法模型

Step1: 对矩阵进行归一化，标准化公式为

$$\frac{c_{ij} - \min\{c_{1j}, c_{2j}, \dots, c_{nj}\}}{\max\{c_{1j}, c_{2j}, \dots, c_{nj}\} - \min\{c_{1j}, c_{2j}, \dots, c_{nj}\}} \quad (13)$$

Step2: 计算第 i 个目标在第 j 个指数中的比例，作为以后计算相对熵的概率。计算方法为

$$p_{ij} = \frac{\tilde{z}_{ij}}{\sum_{i=1}^{17} \tilde{z}_{ij}} \quad (14)$$

Step3: 计算每个属性的信息熵和信息效用值。对于第 j 个属性，其信息熵的计算公式为

$$e_j = -\frac{1}{\ln 17} \sum_{i=1}^{17} p_{ij} \ln(p_{ij}) \quad (j = 1, 2 \dots 6) \quad (15)$$

对于第 j 个属性，其信息效用值的计算方法为

$$d_j = 1 - e_j \quad (16)$$

Step4: 计算每个属性的熵权。每个属性的熵权就是归一化后的信息效用值。其计算方法为

$$w_j = \frac{d_j}{\sum_{j=1}^6 d_j} \quad (17)$$

5.1.2 子模型 2:TOPSIS 模型

Step1:对矩阵 C 进行标准化, 消除不同指标维度的影响。归一化后的矩阵记为, Z 中的每个元素 Z 为

$$z_{ij} = \frac{c_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^{17} c_{ij}^2}} \quad (18)$$

而标准化矩阵 Z 为

$$Z = \begin{bmatrix} z_{11} & z_{12} & \cdots & z_{16} \\ z_{21} & z_{22} & \cdots & z_{26} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ z_{17,1} & z_{17,2} & \cdots & z_{17,6} \end{bmatrix} \quad (19)$$

Step2:定义最优向量和最差向量。我们用来 z^+ 表示最优向量, 也用来 z^- 表示最差向量。因此, z^+ 是

$$z^+ = (\max\{z_{11}, z_{21}, \cdots z_{17,1}\}, \max\{z_{12}, z_{22}, \cdots z_{17,2}\}, \cdots \max\{z_{16}, z_{26}, \cdots z_{17,6}\}) \quad (20)$$

z^- is

$$z^- = (\min\{z_{11}, z_{21}, \cdots z_{17,1}\}, \min\{z_{12}, z_{22}, \cdots z_{17,2}\}, \cdots \min\{z_{16}, z_{26}, \cdots z_{17,6}\}) \quad (21)$$

Step3:计算目标指标与最优向量之间的加权欧几里德距离:

$$D_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^6 w_j (z_j^+ - c_{ij})^2} \quad (22)$$

Step4:计算目标指标与最差向量之间的加权欧几里德距离:

Step5:计算进球得分:

$$D_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^6 w_j (z_j^- - c_{ij})^2} \quad (23)$$

$$s_i = \frac{D_i^-}{D_i^- + D_i^+} \quad (24)$$

每个目标的优先级由 TOPSIS 模型的分数的排序。分数越高, 优先级越高。

5.2 结果与分析

图 5 显示了三国 17 个目标的优先级。对于土耳其来说, 目标 17 和目标 9 的优先级高于其他国家。对于印尼和墨西哥来说, 目标 3 的优先级在很大程度上高于其他目标。优先级的差异主要是由于每个国家的情况不同。



图 5 归一化 TOPSIS 评分雷达图

表 3 所示的结果显示了三个国家的前五大优先目标。我们从表中有了一些发现。我们发现目标 3 和目标 4 在所有国家的前 5 名名单中。目标 3 与健康有关，而目标 4 与教育有关。实际上，卫生和教育是各国非常关注的问题。它们与一个国家的经济和社会发展密切相关。它们对人民的福祉和国家的长远发展有着重要的影响。

表 3 前 5 个优先目标

Turkey		Indonesia		Mexico	
Goal	Score	Goal	Score	Goal	Score
17	0.160	3	0.275	3	0.250
9	0.156	9	0.137	10	0.061
7	0.094	6	0.053	4	0.060
3	0.088	10	0.046	6	0.060
4	0.050	4	0.046	8	0.058

对联合国的建议:总体而言，目标 3 和目标 4 是所有国家的高度优先目标，分别涉及卫生和教育。我们建议联合国组织一些卫生和教育方面的合作计划。在我们所有人的共同努力下，我们可以更有效地实现卫生和教育的目标。此外，目标的优先次序因国家而异。因此，我们建议联合国给予各国更多的自由选择。我们认为让各国自己决定优先事项是个好主意。

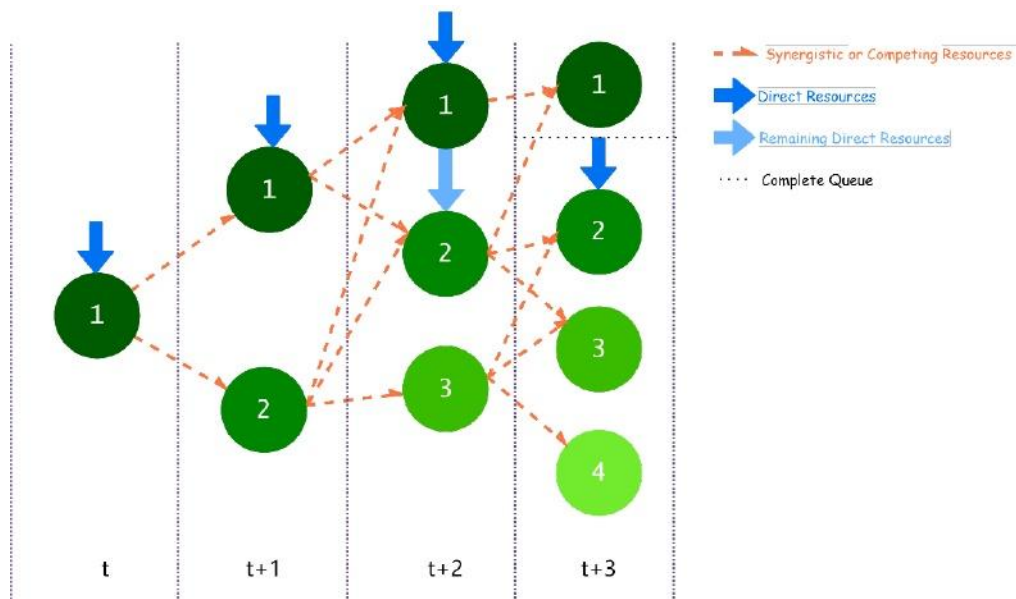
6 未来发展的时间香槟塔模型

当我们为一个由酒杯组成的塔倒香槟时，只有当上面的杯子装满时，下面的杯子才能得到香槟。这一现象启发我们提出了时间香槟塔模型。

我们想要衡量这 17 个目标的完成情况。我们使用时间香槟塔模型来衡量 17 个目标的完成状态，如果它们处于我们设置的优先顺序中。该模型基于假设 2，即所有 17 个可持续发展目标的完成难度相同。这意味着目标 i 完成 1%就等于目标 j 完成 1%。

如图 6 所示，由于我们的优先级被启动，所有的资源将被分配给最高优先级的目标。假设我们总共有 4 个目标。4 个目标的优先级依次为目标 1>目标 2>目标 3>目标 4，如绿色阴影所示。目标 1 与目标 2 是相关的。目标 3 与目标 2 和目标 4 相关。当然，每个目标本身都是相关的。在 year 中，目标 1 将被分配所有资源，如深蓝色箭头所示。目标 2 则有协同或权衡关系与目标 1。因此，明年($t + 1$)标 2 将受益于目标 1 的协同资源或将

开发队列，因为它与目标 2 的关系。我们假设目标 1 在今年所有分配的资源用完之前完成。如浅蓝色箭头所示，部分剩余资源将会分配给目标 2，其优先级仅比目标 1 低一级。然后明年()，目标 1 将被放入完整队列，没有资源分配。目标 2 将分配所有资源，其优先级在其他目标中最高。该模型的数学表达式将在下面的小节中讨论。



6.1 模型的数学建立

为了衡量 17 个可持续发展目标的完成情况，我们用 G_t 来表示 t 年度中 17 个可持续发展目标的完成情况的百分比。因此，我们有

$$G_t = [g_t(1), g_t(2), \dots, g_t(17)] \tag{25}$$

其中 $g_t(i)$ 是 t 年第 i 个目标的完成百分比

我们用 S_t 来表示 t 年度中 17 个可持续发展目标的开发队列。由于我们的优先级已经启动，我们有 $S_t = \{V_i | \forall V_j \in V, s_i \geq s_j\}$ ，其中 s_i 是 5.2 节的 i 优先级得分。然后，在 S_t 一些目标与目标呈正相关或负相关。我们用 S'_t 它来表示所有这些相关目标的集合。因此，我们有

然后一些目标与中的目标正相关或负相关。我们用它来表示所有这些相关目标的集合。因此，我们有

$$S'_t = \{V_j | w_{ij} \neq 0, V_i \in S_t, V_j \notin S_t\} \tag{26}$$

w_{ij} 是两个目标之间的权重。如果 $w_{ij}=0$ ，那么这两个目标是不相关的。

然后我们全年更新到 S_t 。从 $t+1$ 年到 S_{t+1} 。 S_{t+1} 应包括 S_t 所有相关的目标。因此，我们有

$$S_{t+1} = S_t \cup S'_t \tag{27}$$

我们用 D 来表示每年分配给 17 个可持续发展目标的总资源。那么为第 i 个目标分配的资源是 $d_i(i)$ 。我们假设总累积资源与年份呈线性关系。那么每年 D 的总资源量是线性回归斜率的 17 倍。

我们用 $v_t(i)$ 来表示第 i 目标在 t 年的完成百分比的变化，完全是与其他目标及其本身相关的。因此，我们有

$$v_t(i) = \frac{1}{C} \sum_{\substack{j \\ V_j \in S_t}} w_{ij} (v_{t-1}(j) + d_{t-1}(j)) \tag{28}$$

其中 C 是衡量相关影响效率的常数， w_{ij} 是两个目标之间的权重， $v_{t-1}(j)+d_{t-1}(j)$ 表示第 j 个目标 $t-1$ 年获得的总资源。受帕累托原理的启发，我们设 C 为等于 5。

$$d_t(i)=\begin{cases} 0, & \text{if } v_t(i)+g_{t-1}(i)\geq 1 \\ \min\left(1-v_t(i)-g_{t-1}(i),D-\sum_{s(j)>s(i)}\max(0,1-v_t(j)-g_{t-1}(j))\right), & \text{else} \end{cases} \quad (29)$$

如果 $v_t(i)+g_{t-1}(i)\geq 1$ ，这意味着目标目前已经完成了，那么我们就不需要再为它分配资源了。否则，将分配分配更高优先级目标后剩余资源的资源。

因此， t 年 i 目标的 $g_t(i)$ 完成率是：

$$g_t(i)=\min(g_{t-1}(i)+d_t(i)+v_t(i),1) \tag{30}$$

6.2 时间香槟塔模型

基于以上分析，我们的时间香槟塔模型可以总结为：

Target: G_t

$$\left\{ \begin{array}{l} S_t = S_{t-1} \cup S_{t-1}' \\ S_t' = \{V_j | w_{ij} \neq 0, V_i \in S_t, V_j \notin S_t\} \\ v_t(i) = \frac{1}{C} \sum_{V_j \in S_t} w_{ij} (v_{t-1}(j) + d_{t-1}(j)) \\ d_t(i) = \begin{cases} 0, & \text{if } v_t(i)+g_{t-1}(i)\geq 1 \\ \min\left(1-v_t(i)-g_{t-1}(i),D-\sum_{s(j)>s(i)}\max(0,1-v_t(j)-g_{t-1}(j))\right), & \text{else} \end{cases} \\ g_t(i) = \min(g_{t-1}(i)+d_t(i)+v_t(i),1) \end{array} \right. \tag{31}$$

6.3 基于时间序列算法的模型解决方案

时间香槟塔模型对应的算法如表 4 所示。通过该算法，我们可以预测未来 10 年每个目标的完成百分比。

表 4 模型对应的算法

Algorithm: Solutions of Cooperation Strategy Model
Input: $D, \mathcal{G}(V,E,W), s$
Output: G_{10}
1: for $i := 1:17$
2: Initialize $v_0(i) := 0, d_0(i) := 0$
3: Initialize $S_1 = \{V_i \forall V_j \in V, s_i \geq s_j\}$
4: for $t := 1:10$
5: for $i := 1:17$
6: Update $v_t(i)$ via equation (28)
7: Update $d_t(i)$ via equation (29)
8: Update $g_t(i)$ via equation (30)
9: end
10: Update S'_t via equation (26)
11: if $t < 10$
12: Update S_{t+1} via equation (27)
13: end
14: end

6.4 实现一个目标

如图 7 所示，我们假设目标 3 以年为单位实现。那么目标 3 将被放入完整的队列中，如图中的气泡所示。对于未完成的目标，优先级不会发生变化。这是因为优先级的确定是基于对长期数据的可靠分析。我们认为，由于一些突发事件而改变优先级是不合适的。因此，在今年，资源将分配给目标 1，它在发展清单中拥有最高的优先级。有些目标可能会与目标 3 竞争资源。因此，目标 3 可能会回到未完成状态。这在我们的日常生活中是相当常见的。一个农民可能在去年摆脱了贫困，但由于诸如恶劣天气等因素，明年又回到了贫困状态。所以，目标 3 又回到了发展清单，但现在它拥有最高的优先权。这是因为，虽然回到了未完成状态，但 Goal 3 仍然非常接近完成状态。因此，将目标 3 设置为最高优先级是合理的。分配完之后，会有一些剩余的资源，如浅蓝色箭头所示。剩余的资源可以分配给目标 1，目标 1 在其他资源中具有最高的优先级。它也可以分配给与目标 3 密切相关的其他目标，应该添加到 sgd 中。对于多个完整目标，它们之间的优先级按照 priority Model 得到的优先级顺序进行排序。任何一个完整目标的优先级都大于不完整目标。

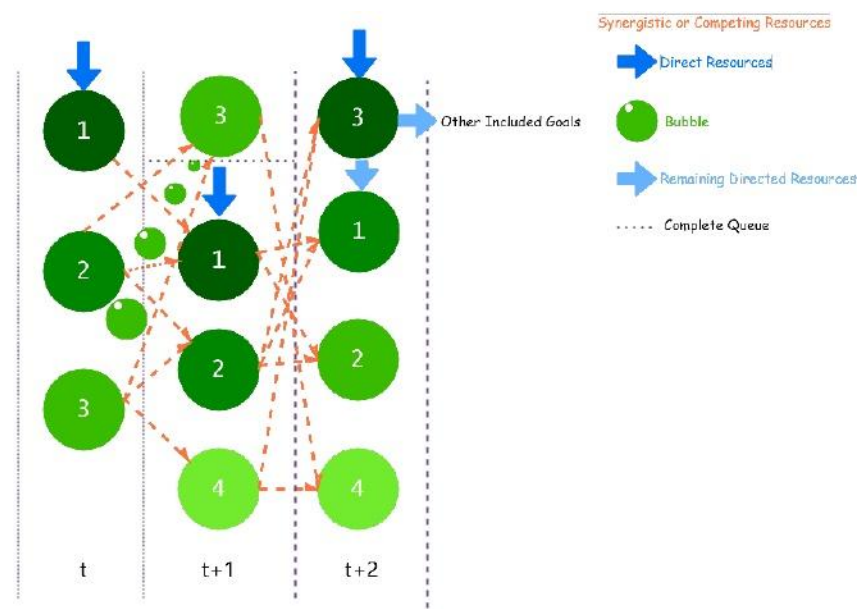


图 7 目标实现时的时间香槟塔模型概述

6.5 结果与分析

为了做模拟，我们从权威网站获得一些数据[15]。由于，每个国家都有不同的情况，我们选择印度尼西亚作为例子。如表 5 所示，到 2033 年，印尼可以实现目标 3、目标 4、目标 6、目标 9 和目标 13。前 4 个目标一般都是民生方面的。第五个目标是关于气候的。总的来说，印尼在 10 年内实现了总体目标增长的 13%。

图 8。A 显示了随着时间的推移，每个目标改变的完成百分比。从 2025 年到 2026 年，实现目标 3，剩余资源分配给目标 9。因此，我们可以注意到，2025 年到 2026 年，目标 9 实现了巨大的飞跃，如橙色线所示。之后，Temporal Champagne Tower Model 中的网络结构发生了变化。与目标 9 正相关的目标增加更快。这种影响来自于目标 3 的实现。当实现其他目标时，也会产生类似的影响。考虑到当一个目标已经完成，虽然不能超过 100%，但它的相关效益可以影响到其他国家。因此，我们提出目标 18:国际合作。利用完成目标的相关效益，帮助其他国家实现目标。例如，既然实现了目标 3，我们强调卫生方面的国际合作。

如图 8 所示。b，橙色线表示时间香槟塔模型总体目标完成百分比的变化。蓝线表示线性回归的结果及其预测。根据我们的模型，到 2033 年，印尼可以实现 82%的可持续发展目标。然而，根据其目前的计划，中国可以实现 78%的可持续发展目标。因此，我们的模式可以使印尼多实现 4%的可持续发展目标，这表明了我们模式的优越性。

给联合国的建议:时间香槟塔模型使印度尼西亚到 2033 年实现可持续发展目标的 82%，比目前计划的预测结果高出 4%。如果联合国能将我们的模式推荐给其他国家，我们将不胜感激。我们的模式可以促进可持续发展目标的实现速度。此外，到 2033 年，目标 7、目标 11 和目标 17 的完成率都不到 60%。对于印尼这样的国家来说，实现这些目标的成本太高了。因此，我们建议联合国为印度尼西亚这样的国家降低这三个目标的标准。我们还建议联合国呼吁一些发达国家向这些国家提供一些帮助。

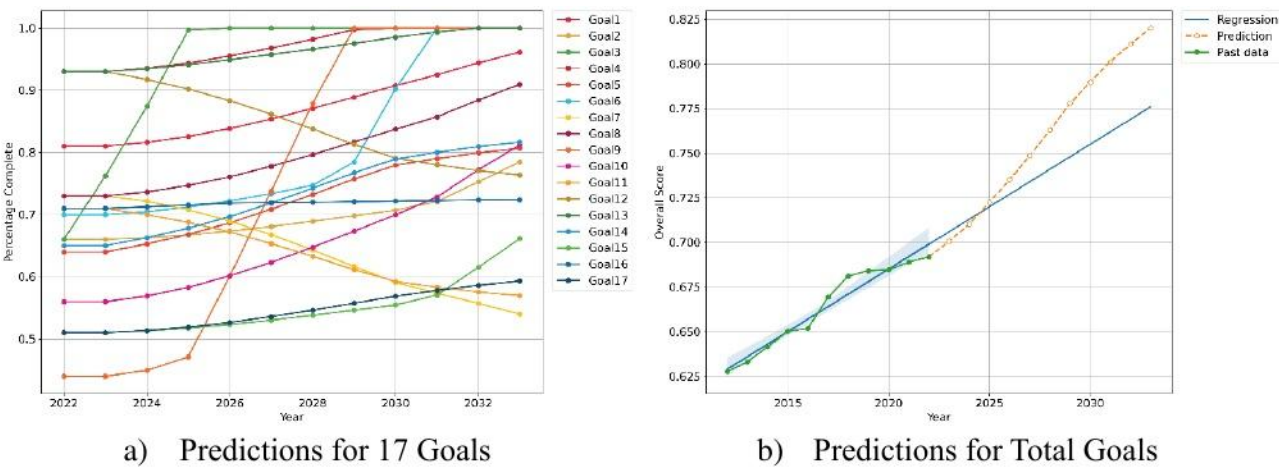


图 8 对未来十年的预测

表 5 百分比完整比较

	Goal 1	Goal 2	Goal 3	Goal 4	Goal 5	Goal 6	Goal 7	Goal 8
2022/2033	81/96	66/78	66/100	93/100	64/81	70/100	73/54	73/91

表 5 百分比完整比较(续)

Goal 9	Goal10	Goal11	Goal12	Goal13	Goal14	Goal15	Goal16	Goal17	Total
44/100	56/81	71/57	93/76	93/100	65/82	51/66	71/72	51/59	69/82

7 影响分析

7.1 COVID-19 对模型的影响

COVID-19 的影响是复杂的。一些目标受到疫情的威胁。一些目标可能减轻或加剧其影响。基于 Robin Naidoo[7]的研究，我们对我们的模型进行了一些调整。我们用系数 τ_i 来衡量 i 目标的威胁程度。如果一个目标受到威胁，其分配的资源将受到影响。因此，我们将式(29)更新为

$$d_t = \begin{cases} 0, & \text{if } v_t(i) + g_{t-1}(i) \geq 1 \\ \gamma_i \cdot \min\left(1 - v_t(i) - g_{t-1}(i), D - \sum_{s(j) > s(i)} \max(0, 1 - v_t(j) - g_{t-1}(j))\right), & \text{else} \end{cases} \quad (32)$$

有些目标可能会减轻或加剧 COVID-19 的影响，这意味着它们的优先事项可能会被改变。我们用参数来衡量 i 目标的减轻或加重程度。

然后将方程(11)更新为

$$c_i=[BC^+_i,CC^+_i,EC^+_i,BC^-_i,CC^-_i,EC^-_i,MI_i]^T$$
 (33)

调整后，我们重新运行优先级模型和时间香槟塔模型来研究 COVID-19 的影响。

7.2 结果与分析

如表 6 所示，到 2033 年，印尼可以实现目标 3、目标 4 和目标 9。与之前没有 COVID-19 影响的结果相比，遗漏了两个目标。总的来说，印尼在 10 年内实现了总体目标增长的 9%，比之前的结果低了 4%。

图 9。A 显示了随着时间的推移，每个目标改变的完成百分比。对比图 8。a，由于 COVID-19 的影响，所有目标都在晚些时候实现。

如图 9 所示。b，橙色线表示不受 COVID-19 影响的百分比变化。绿线表示受 COVID-19 影响的变化。蓝线表示线性回归的结果及其预测。到 2033 年，印度尼西亚可以在不受 COVID-19 影响的情况下实现 82%的可持续发展目标。然而，它只能实现 78%的可持续发展目标。疫情过后，可持续发展目标的发展速度也变慢了。

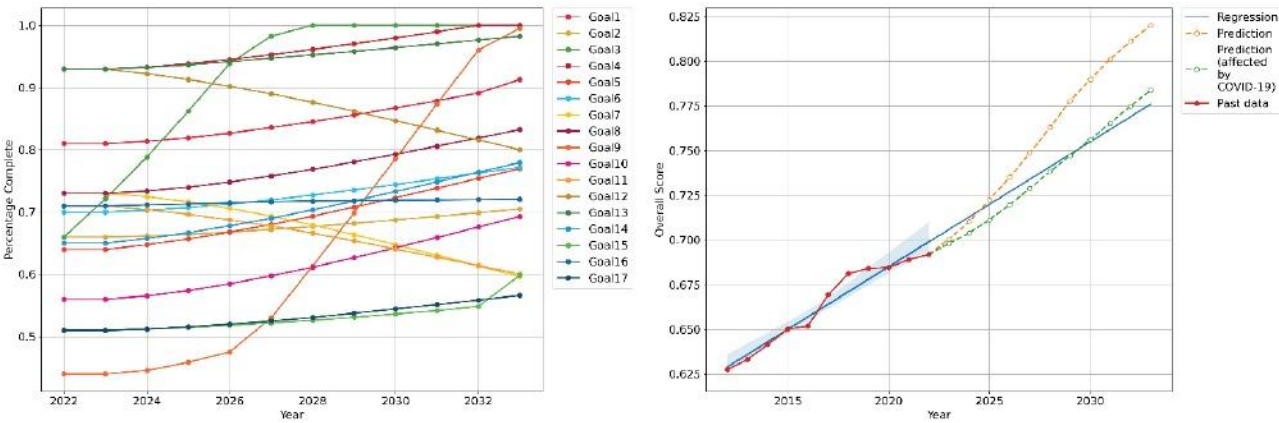


图 9 受 COVID-19 影响的未来 10 年预测

表 6 COVID-19 影响百分比完整比较

	Goal 1	Goal 2	Goal 3	Goal 4	Goal 5	Goal 6	Goal 7	Goal 8
Without/With	96/91	78/70	100/100	100/100	81/77	100/77	54/60	91/83

Table 6 Percentage Complete Comparison on the Effect of COVID-19(continued)

Goal 9	Goal10	Goal11	Goal12	Goal13	Goal14	Goal15	Goal16	Goal17	Total
100/100	81/69	57/60	76/80	100/98	82/78	66/60	72/72	59/57	82/78

对联合国的建议:COVID-19 等意外事件对可持续发展的发展速度产生巨大影响。因此，我们建议联合国适当延长实现可持续发展目标的最后期限。此外，一些目标的优先级也可能受到影响。这意味着联合国可能需要调整其工作的重点。建议制定一些计划，以减轻这些意外事件的影响。

7.3 模型对公司和组织的影响

包含 17 个可持续发展目标的可持续发展框架可以为公司或组织提供指导方向甚至战略。我们之前的工作是基于国家层面的数据。不同规模的公司或组织需要不同的策略。一个公司或组织所能提供的社会资源总量往往小于一个国家。公司或组织需要更仔细地考虑不同目标的优先级。

首先要指出的是，目标在国家层面的优先级越高，对目标的需求和投入就越大。因此，较小的公司或组织可以根据自己的业务或定位，结合从我们的网络中获得的国家层面的优先级，推导出企业或组织层面的优先级。使用这种优先级来指导发展的公司或组织可能更容易获得投资或捐赠，以保持长期的可持续发展。

对于大公司或组织来说，他们比小公司更容易获得投资或捐赠。因此，他们可以在可持续发展目标提供的全球共同框架内考虑多个优先事项或多个目标之间的协同作用。多个可持续发展目标之间的协同作用可以通过我们的优先模型来实现。如果一个公司或组织需要一个长期的视角，它可以使用我们的时间香槟塔模型和一些数据来调整其目标的优先级。

值得注意的是，我们的模型将反映某些国际危机的影响，例如 COVID-19，这要求公司或组织适应时代，专注于选定的可持续发展目标。

我们的模型对公司或组织的使用情况可以总结为图 10。

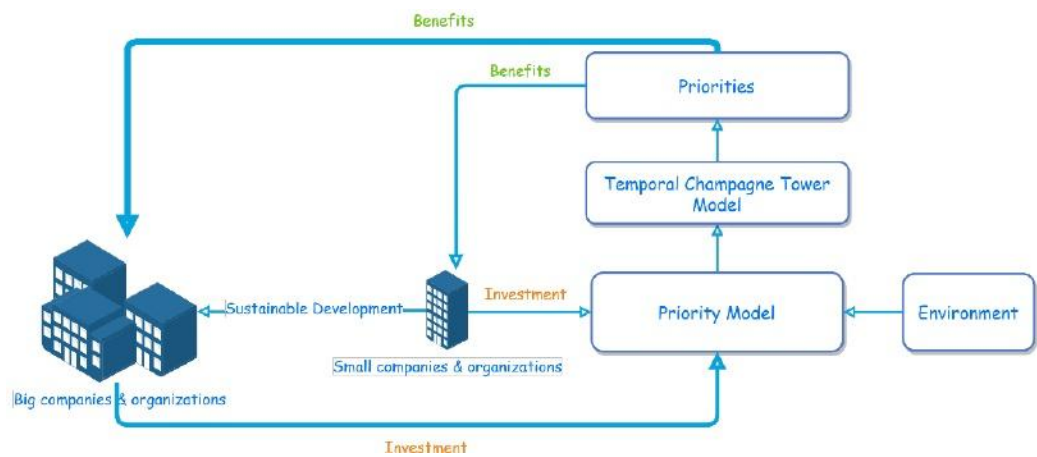


图 10 公司或组织如何使用我们的模型

8 敏感性分析

为了评价时间香槟塔模型的灵敏度和鲁棒性，我们分别对超参数和时间香槟塔模型进行了两次灵敏度检验。 C 是衡量协同效率的常数， D denotes 每年为 17 个可持续发展目标分配的资源总量。

在第 6 节中，我们以年为自变量，以总分为因变量，对印度尼西亚 2012 年至 2022 年的总分进行了线性回归。在这里，我们对土耳其和墨西哥做同样的事情。土耳其和 2 墨西哥的线性回归的 R and p 值分别为 0.767、 4.13×10^{-4} and 0.882、 1.78×10^{-5} ，表明线性回归的有效性。

通过线性回归分别为两国确定 D are 值的 95% 置信区间。我们选择区间中点的 17 倍作为 D and 的估计值，土耳其和墨西哥分别得到 D of 0.036 和 0.071。在第 6 节中，我们已经确定印度尼西亚的 D 为 0.102。

当我们在进行敏感性测试时，我们以 0.1 的步长遍历 C from 4 到 6 的值，并对每个 c 值分别运行时间香槟塔模型，结果如图 11.a 所示。图中两条红色虚线的交点表示我们的 $\langle s:1 \rangle$ 值和第 6 节中的最终总分。

在对 D 进行灵敏度测试时，我们固定 C to 5，以 1.62×10^{-3} 的步长遍历 D from 0.102 到 0.136 的值，并将结果显示在图 11.b 中。图中两条红色虚线的交点代表我们的 D value 和第 6 节中的最终结果。从对 `youdaopplaceholder0` 的敏感性分析结果可以看出，三条线的变化趋势比较平缓。印度尼西亚的总分最大值和最小值之差，土耳其和墨西哥分别为 0.041、0.007 和 0.006。

来自图 11. B，我们可以看到， Dis 的变化引起的总分变化非常小。印尼的总分最大值和最小值的差值是 0.028。

上述分析表明，我们的时间香槟塔模型对超参数和不敏感，因此具有鲁棒性。

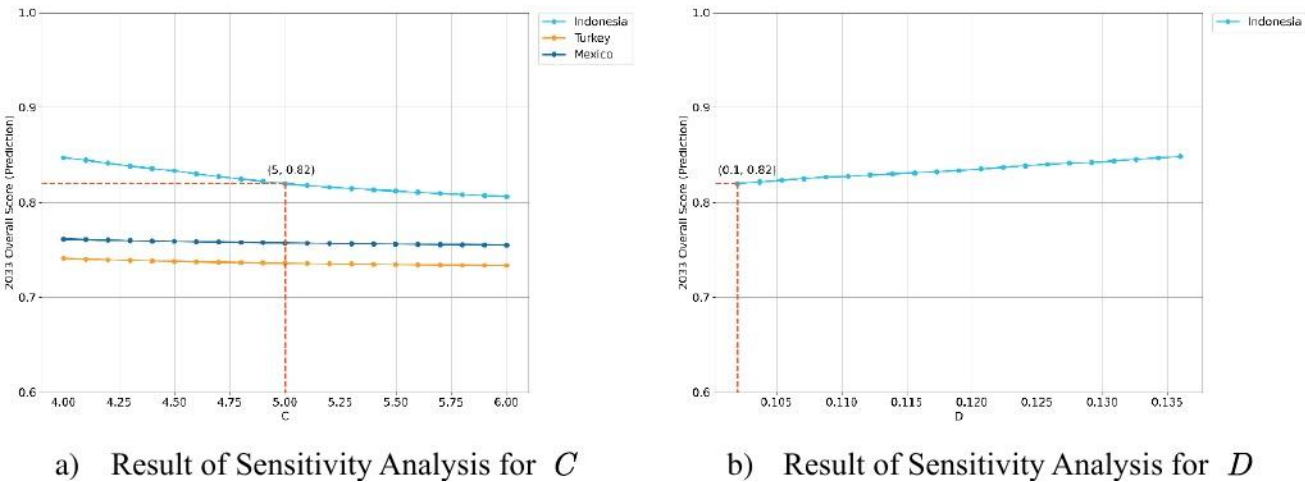


图 11 C 和 D 的敏感性分析结果

9 模型评价和进一步讨论

9.1 模型的优势

全面性

在关系图模型和优先级模型中，我们同时考虑了正相关效应和负相关效应。在时间香槟塔模型中，我们讨论了许多因素

包括新目标的提出和已完成目标的巩固。

鲁棒性

我们的模型对于不同国家不同常数都能得到合理的结果。我们受到香槟塔的启发，建立了基于时间网络的 TCTM。通过仿真结果，我们的模型很好地解释了需求，并提出了更有意义的建议。

9.2 模型的不足

超参数很难估计

在第 7 节中，我们使用 Nature 上一篇文章中的专家数据估计了修改后的 TCTM 中的超参数(我们修正了 TCTM 以反映大流行的影响)。然而，这样的专家数据并不容易获得，因此我们修改模型的超参数也很难估计。

参考文献

- [1]. G. H. Brundtland, "World commission on environment and development," Environmental policy and law, vol. 14, no. 1, pp. 26–30, 1985.
- [2]. Wu J, Guo S, Huang H, et al. Information and communications technologies for sustainable development goals: state-of-the-art, needs and perspectives[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2018, 20(3): 2389-2406.
- [3]. "Transforming our world: the 2030 agenda for sustainable development," UN General Assembly, New York: United Nations, 2015.
- [4]. Le Blanc D. Towards integration at last? The sustainable development goals as a network of targets[J]. Sustainable Development, 2015, 23(3): 176-187.
- [5]. Swain R B, Ranganathan S. Modeling interlinkages between sustainable development goals using network analysis[J]. World Development, 2021, 138: 105136.
- [6]. Pradhan P, Costa L, Rybski D, et al. A systematic study of sustainable development goal (SDG) interactions[J]. Earth's Future, 2017, 5(11): 1169-1179.
- [7]. Naidoo R, Fisher B. Reset sustainable development goals for a pandemic world[J]. Nature, 2020, 583(7815): 198-201.
- [8]. Mukarram M. Impact of COVID-19 on the UN sustainable development goals (SDGs)[J]. Strategic Analysis, 2020, 44(3): 253-258.
- [9]. United Nations Statistics Division, United Nations Global SDG Database, 2016. <https://unstats.un.org/sdgs/indicators/database>.
- [10]. Hauke J, Kossowski T. Comparison of values of Pearson's and Spearman's correlation coefficients on the same sets of data[J]. Quaestiones geographicae, 2011, 30(2): 87-93.
- [11]. Freeman L. A Set of measures of centrality based on betweenness. Sociometry, 1977, 40(1): 35- 41.
- [12]. Sabidussi G. The centrality index of a graph. Psychometrika, 1966, 31(4): 581-603
- [13]. Bonacich P. Power and centrality: A family of measures. American Journal of Sociology, 1987, 92(5): 1170-1182.
- [14]. Hwang C L, Yoon K, Hwang C L, et al. Methods for multiple attribute decision making[J]. Multiple attribute decision making: methods and applications a state-of-the-art survey, 1981: 58-191.
- [15]. <https://dashboards.sdgindex.org>.

表 7 印度尼西亚图参数

	Goal 1	Goal 2	Goal 3	Goal 4	Goal 5	Goal 6	Goal 7	Goal 8
BC^{+}	0.001	0.001	0.237	0.001	0.000	0.001	0.000	0.001
CC^{+}	0.754	0.754	0.929	0.754	0.503	0.754	0.000	0.754
EC^{+}	0.303	0.303	0.316	0.303	0.058	0.303	0.000	0.303
BC^{-}	0.000	0.000	0.144	0.000	0.000	0.000	0.914	0.000
CC^{-}	0.480	0.480	0.571	0.480	0.000	0.000	0.857	0.480
EC^{-}	0.197	0.197	0.308	0.197	0.000	0.000	0.657	0.197

表 8 印度尼西亚图参数(续)

Goal 9	Goal 10	Goal 11	Goal 12	Goal 13	Goal 14	Goal 15	Goal 16	Goal 17
0.106	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000
0.862	0.754	0.000	0.000	0.710	0.503	0.754	0.483	0.710
0.313	0.303	0.000	0.000	0.277	0.058	0.303	0.029	0.277
0.144	0.000	0.005	0.005	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.571	0.480	0.400	0.400	0.480	0.000	0.480	0.000	0.480
0.308	0.197	0.185	0.185	0.197	0.000	0.197	0.000	0.197

表 9 土耳其图参数

	Goal 1	Goal 2	Goal 3	Goal 4	Goal 5	Goal 6	Goal 7	Goal 8
BC^{+}	0.000	0.000	0.104	0.000	0.000	0.000	0.132	0.000
CC^{+}	0.635	0.310	0.710	0.635	0.431	0.635	0.447	0.635
EC^{+}	0.326	0.005	0.343	0.326	0.038	0.326	0.041	0.326
BC^{-}	0.022	0.196	0.252	0.000	0.000	0.000	0.046	0.000
CC^{-}	0.520	0.722	0.619	0.464	0.394	0.481	0.481	0.481
EC^{-}	0.257	0.472	0.294	0.108	0.062	0.209	0.226	0.209

表 10 土耳其图参数(续)

Goal 9	Goal 10	Goal 11	Goal 12	Goal 13	Goal 14	Goal 15	Goal 16	Goal 17
0.236	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.242
0.754	0.000	0.447	0.000	0.635	0.000	0.635	0.447	0.710
0.347	0.000	0.076	0.000	0.326	0.000	0.326	0.076	0.331
0.054	0.491	0.000	0.010	0.022	0.000	0.022	0.000	0.000
0.520	0.813	0.000	0.419	0.520	0.000	0.520	0.000	0.464
0.232	0.510	0.000	0.112	0.257	0.000	0.257	0.000	0.108