

超越 GDP:绿色 GDP 革命引领可持续未来

摘要: 传统上, GDP 被用作衡量一个国家经济健康状况和指导其发展的关键指标。然而, 除了当前的经济生产, 为子孙后代保存资源也很重要。为了满足这一需求, 引入了绿色 GDP(GGDP)作为评估一个国家可持续发展潜力的一种方式。我们利用数学模型探讨了以 GGDP 取代 GDP 作为主要经济指标的潜在全球影响。

对于任务 1, 我们提出了 GGDP 的核算方法, 并据此预测了全球 GGDP。我们的方法建立在根据环境损害调整 GDP 方法的基础上, 通过从传统的 GDP 中减去环境损害来改进它。在计算 GGDP 时, 我们考虑了环境破坏的四个主要方面。本文还研究了 GGDP 与 GDP 之间的关系, 并推导出比值生命周期定律。运用比率生命周期法和时间序列分析, 我们预测 2050 年全球 GGDP 将达到 1440 亿美元, gdp 与 gdp 之比为 0.76。

对于任务 2, 我们首先建立了气候减缓的综合评估模型(Comprehensive Evaluation Model of climate mitigation), 研究这种转变对气候减缓的影响。采用 AHP, 选取 6 个一级指标和 15 个二级指标, 构建了指标体系。然后使用群决策法和熵权法计算权重。利用任务 1 的预测结果, 我们分析了转移对每个次要指标的影响, 并评估了对气候减缓各个方面的影响。结果表明, 到 2050 年, 温室气体排放的改善幅度最大, 预计将减少 26.61%的排放量, 减少 49.71% NO_x 的排放量。

对于任务 3, 我们测量了转变的好处和坏处。为了分析其对全球各行业的影响, 我们建立了生产要素流动的非线性规划模型, 并考察了受转移影响最大的六个行业之间的资本和劳动力流动。我们对这一转变在全球范围内的 10 年影响的分析表明, 技术和服务业将受益最大, 而制造业、能源和采矿业将受到最严重的打击。我们还检查了总价值, 发现从长远来看, 这种转变将增加全球产量, 强调其价值。

对于任务 4, 我们分析了这种转变对秘鲁的影响。根据我们以前的模型, 我们得出结论, 秘鲁仍处于初级阶段, GGDP 增长速度较低, 秘鲁最需要改进的领域是能源效率。考虑到秘鲁独特的产业结构和与智利在南美铜市场的竞争, 我们建立了一个超级博弈模型。经过分析, 我们建议秘鲁未来应在经济充分发展后转型。

最后, 进行敏感性分析。我们观察到目标函数的值随着参数的调整而变化, 其变化趋势是合乎逻辑的。这证明了我们模型的灵敏度和可靠性。

关键词:绿色 GDP, 气候减缓, 生命周期曲线, AHP, EWM, 非线性规划, 超级博弈论

目录

超越 GDP:绿色 GDP 革命引领可持续未来..... 1

1 介绍..... 4

 1.1 背景..... 4

 1.2 问题的重述..... 4

 1.3 我们的工作..... 4

2 模型准备..... 5

 2.1 符号..... 5

 2.2 数据收集和清理..... 6

3GGDP 的计算..... 6

 3.1 GGDP 的计算..... 6

 3.2 全球统计..... 7

 3.3GGDP 预测..... 8

 3.3.1 预测方法..... 8

 3.3.2 预测结论..... 9

4 模型一:气候减缓评估模型..... 9

 4.1 建立 AHP 模型..... 9

 4.1.1 评价模型的标准..... 9

 4.1.2 指标选择..... 9

 4.1.3 权重的计算..... 10

 4.1.4 评估结果..... 12

5 模型二:全球影响的非线性规划模型..... 14

 5.1 生产要素的流动分析..... 14

 5.2 生产要素流优化模型..... 15

 5.3 影响结果..... 17

6 案例研究:秘鲁如何在转变中生存..... 18

 6.1 秘鲁简介..... 18

 6.2 转移对秘鲁的影响..... 18

 6.3 理性秘鲁博弈模型..... 19

 6.3.1 理性智利:完全信息下的静态博弈模型..... 19

 6.3.2 勇敢的智利:超级博弈论模型..... 19

 6.4 秘鲁分析结论..... 20

7 敏感性分析..... 20

8 模型评估21

 8.1 优势 21

 8.2 缺点 21

References22

给秘鲁领导人的报告23

1 介绍

1.1 背景

国内生产总值(GDP)是衡量一个国家或地区经济增长的常用指标。但由于忽略了单纯追求经济增长所造成的污染、生活环境恶化等负面因素，近年来引起了许多经济学家的争议。

绿色 GDP 的概念起源于 1971 年美国麻省理工学院提出的生态需求指数(EDI)。该指数主要描述了经济增长与资源环境压力之间关系的定量度量。1993 年，联合国经济和社会事务部提出了绿色 GDP 的概念，并在订正的国民核算体系中提出了“总值”和“净值”的概念。此后，各国科学家在其可持续发展项目中不断完善绿色 GDP 的概念。

1.2 问题的重述

对于所给出的要求，我们会进行重述，以帮助更好地定位我们的工作重点。

- 我们需要为任务 1 选择一种计算 GGDP 的方法来衡量气候减缓。
- 在任务 2 中，我们应该建立一个模型来评估气候减缓转变的全球影响。
- 在任务 3 中，比较气候减缓的好处和这种转变的潜在缺点。
- 在任务 4 中，分析这一转变对特定国家的影响，包括资源和可持续发展方面的影响。
- 此外，我们需要就是否转变向选定国家的领导人提供建议到 GGDP。

1.3 我们的工作

根据要求的重述，我们的工作可以总结如下：

- 建立 GGDP 的计算方法，计算 1965 - 2021 年世界 75 个主要国家的 GGDP 数据。
- 构建气候综合评价体系。通过比值生命周期理论预测未来 GGDP，可以定量估计 GGDP 计算公式中各环境因子的变化趋势。由于环境因子与评价体系中的次要指标相关，我们可以据此预测气候减缓的全球影响。
- 建立非线性规划模型，研究生产要素在各行业间流动转移的影响，从而探索其优势和阻力。
- 在前人模型的基础上，分析这一转变对秘鲁的影响，建立秘鲁铜矿采矿业的超级博弈模型。
- 对参数增长或收缩时的非线性规划模型进行敏感性分析。

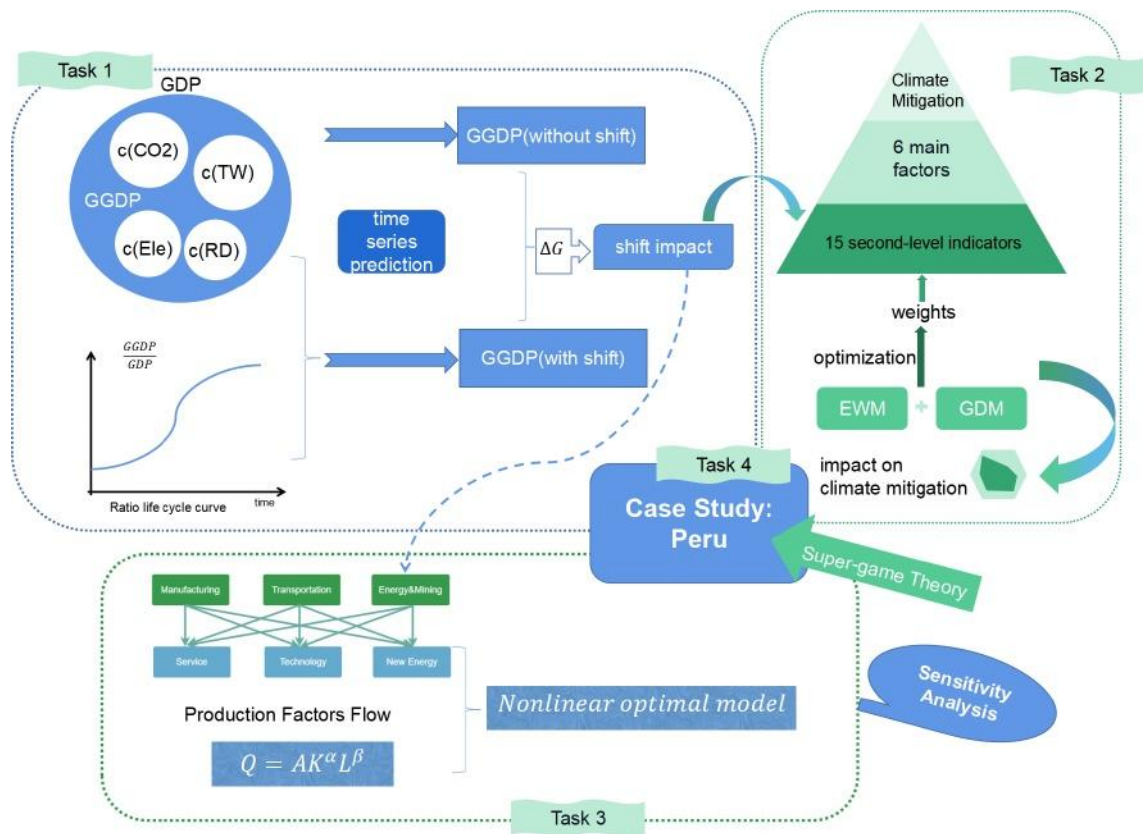


图 1:我们研究的框架

2 模型准备

- 我们从网站收集的数据是真实可靠的。我们的数据来源于官方统计网站和数据库，并经过科学的预处理。
 - 通过样本可以估计总体情况。由于缺少统计数据，我们无法研究世界上所有的国家。所以我们需要假设我们研究的 75 个国家代表了全球的情况
 - 在预测未来几十年的情况时，忽略爆炸性的变化。全球灾难包括严重的流行病会从各个方面带来不可估量的影响，这是我们无法预测的。
 - 间接环境损失省略。为了可行性和避免重复计算，我们认为最重要的环境损失来自四个方面:温室气体、火力发电、废物排放和自然资源损失。
 - 关于温室气体，我们只考虑了碳捕集和 NOx 。这两个类别这两类温室气体对生态影响最大。
- 以下各节给出了具体模型下的假设。

2.1 符号

表 1:注释

Symbol	Definition	Unit
C_k	the constant coefficient for term k	-
E_{total}	the total electricity consumption	kWh
$KtCO_2$	the carbon dioxide emission	kt
KW	the mass of total waste	kt
p	the disposal cost of unit quality waste	\$
NRD	total natural resource depletion	trillion \$
G	the value of GGDP without the impact of shift	trillion \$
\hat{G}	the value of GGDP with the impact of shift	trillion \$

*其他批注说明将在正文中给出。

2.2 数据收集和清理

收集足够的数据是建立完整的指标体系的基础。我们的数据主要收集自世界银行网站、Wind 数据库和国家统计局。数据来源汇总见表 2。

Database	Website
World Bank	https://data.worldbank.org/
OECD	https://stats.oecd.org/
UN DH-Library	https://www.un.org/en/library/page/databases
BEA Data	https://www.bea.gov/data

数据预处理分为三个步骤:数据填充、异常值处理和归一化。

•数据填充:如果与其他年份的相关性比较强，我们使用回归插值的方法，或者用其他年份的平均值来填充缺失的年份。

•处理 Outliers:我们对每个指标进行分析，并偏离可能出现的异常数据
损害我们模型的准确性和有效性。

•数据归一化:我们对不同指标的数据进行归一化，以便在同一尺度上进行比较。我们将使用的指标分为效益属性和成本属性，并按比例缩放到[0,1]。

3GGDP 的计算

3.1 GGDP 的计算

绿色 GDP 旨在通过考虑经济增长的负外部性，如空气和水污染、森林砍伐和不可再生资源的枯竭，提供一种更全面的经济绩效衡量标准。

绿色 GDP 没有单一的“官方”计算方法。我们选择 ANI 作为我们方法的基础，因为它是 GDP 的扩展。在 GDP 的基础上增加了衡量生态发展的部分。然而，ANI 公式也有多种形式。为了避免争议，我们将 GGDP 修改为两个部分:GDP 和环境破坏成本。[1]

$$GGDP = GDP - c(CO_2) - c(Ele) - c(Wa) - c(RD)$$

(1)

第一个扣减是 2 指的是:CO₂排放的成本(2 即:CO₂排放乘以碳市场价格), 第二是能源污染的成本, 第三是一吨可用于生产电能的废物的机会成本), 第四是调整后的自然资源枯竭储蓄占每个国家国民总收入的百分比。

更具体地说, 这个公式可以改写为:

$$GGDP = GDP - C_1 * KtCO_2 * PCDM - C_2 * (1 - \delta) * E_{total} * Pelect - C_3 * TW * p - \left(\frac{GNI}{100} * \%NRD \right) \tag{2}$$

式 k 中 C_k 为第 k 项的常系数, $KtCO_2$ 为以千吨表示的二氧化碳排放量, $PCDM$ 为以 PPP 计算的碳的平均体积加权价格, E_{total} 为总用电量, TW 为总废物质量, p 为单位质量废物的处理成本。GNI(国民总收入)是所有居民生产者的增加值加上未包括在产出估值中的任何产品税(减去补贴)加上来自国外的初级收入净收入(雇员补偿和财产性收入)的总和。NRD 表示自然资源耗竭是净森林耗竭、能源耗竭和矿物耗竭的总和。

3.2 全球统计

我们需要每个国家的 GDP、CO₂ 排放、电力消耗、矿产和森林消耗的数据来计算 GGDP。由于统计缺失程度较大, 我们最终选择 75 个国家作为 1965 年至 2021 年全球形势的代表。从 GDP 到 GGDP 的转变, 是从根本上改变了国家对环境保护的态度。也就是说, 国家非常重视环境保护。因此, 这种转变的影响可以通过那些最具环保意识的国家来研究。

我们选择了 2021 年 ggdp 与 gdp 之比最高的 10 个国家。GDP 和 GGDP 的全球平均值和 10 国平均值如图 2 所示。如图所示。

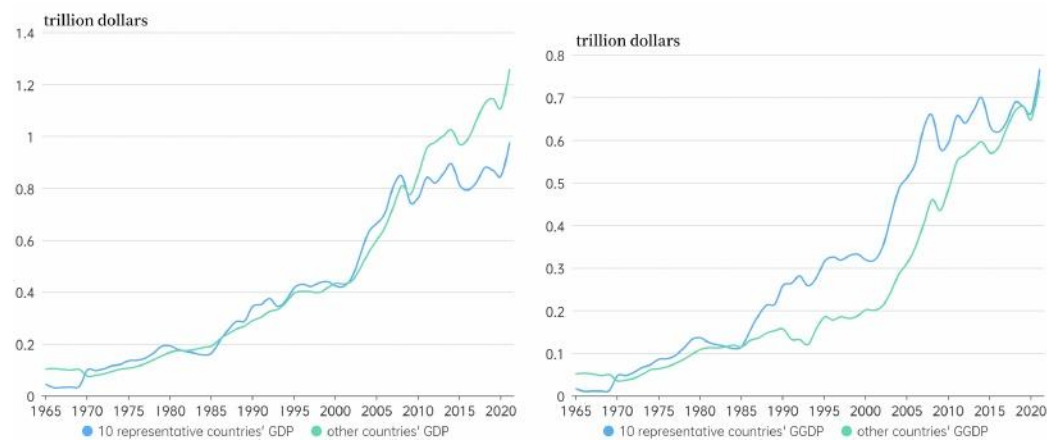


图 2:全球 GDP 和 GGDP 值

十个最具环保意识的国家的平均 GDP 趋势与其他国家的趋势相似, 因此我们可以推断, 这种转变不会改变整体 GDP 的发展趋势。

GGDP 与 GDP 的比值可以用来衡量各国的环境保护程度。图 3 的左子图反映了这十个国家半个世纪的平均比率, 显示了基本同步并最终接近极限的趋势。

与其他国家相比, 这十个国家呈现出明显的周期性增长趋势。作为先行者国家, 它们的增长主要得益于逐步改善的环境政策。我们可以利用这种周期性趋势来预测 GGDP 作为政策转变对每个国家的影响

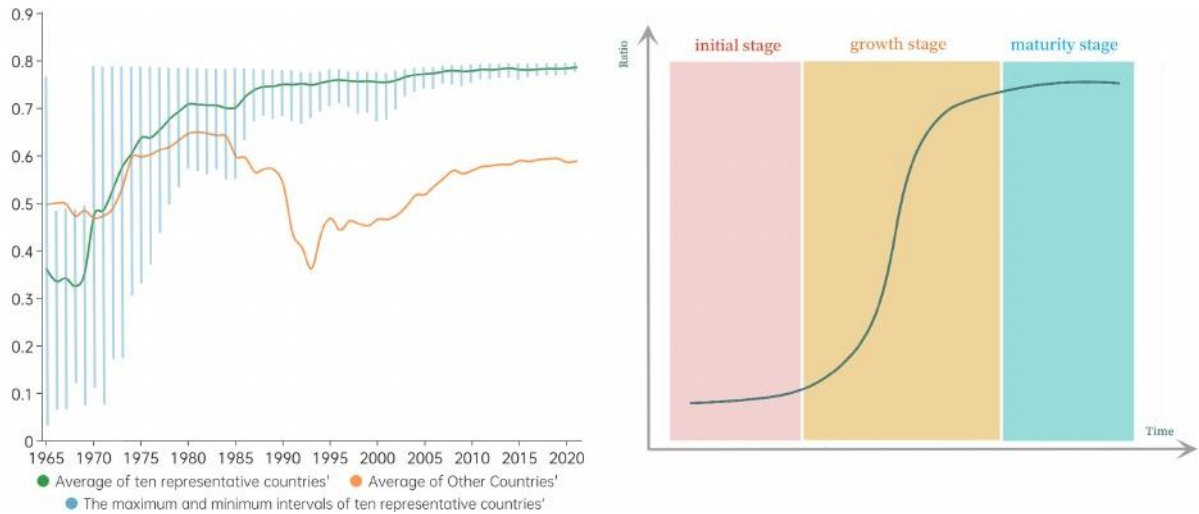


图 3:比率图和比率生命周期曲线

我们做出这十个国家的平均曲线(图 3 右图), 并将其命名为比率生命周期曲线。我们通过更多国家的曲线总结出以下规律:

- 该比率有一个上限, 可以假设所有国家都会达到这个上限
- 未来的上限
- 每个国家的比例发展可以分为三个阶段:初始阶段, 成长期和成熟期。这三个阶段与国家在环保方面的表现密切相关, 符合国家环保能力的增长。
- 在初始阶段, 国家高度重视经济增长, 缺乏环保意识, 因此比例较低且稳定。
- 在成长期, 作为成熟的经济体, 国家开始重视可持续发展, 占比也快速提高。
- 最后, 在成熟阶段, 随着国家在环保方面的表现已经完善, 该比率将不断接近其理论上限。
- 理论上限可以缓慢提高。这与当前世界环境保护技术的发展程度和资源禀赋有关。当科学技术不断提高, 资源利用不断优化时, 该比值的上限将缓慢攀升。

3.3GGDP 预测

3.3.1 预测方法

根据前一节的比率生命周期理论, 我们可以按照以下步骤进行预测:

- 第一步, 通过一个国家五年内的比率来识别阶段。
- 第二步, 根据比率生命周期曲线预测比率的发展。
- 步骤 3, 使用时间序列预测该国的 GDP, 然后将 GDP 乘以得到未来 GGDP 的比值。

这样, 我们隐含地将所有国家分为三类, 并给出相应的预测规则。到 2050 年, 全球 GGDP 如下图所示。我们还在地图上标出了预测的 2050 年 GGDP。

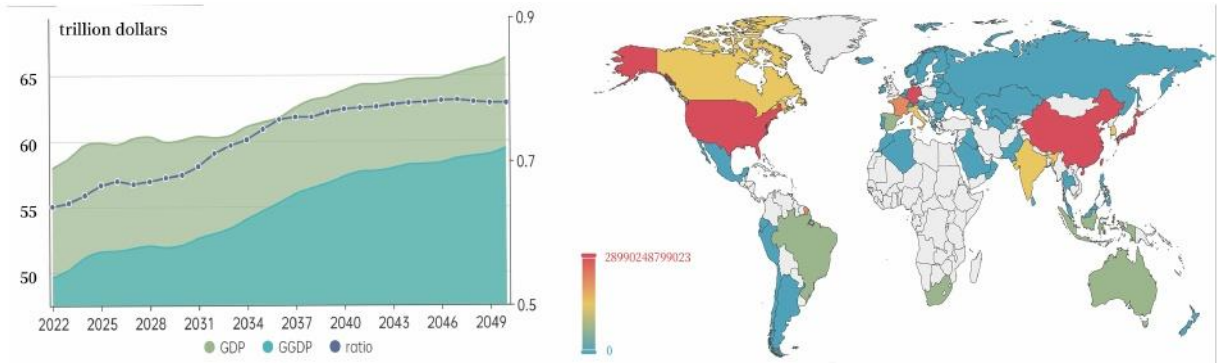


图 4:GGDP 值预测

3.3.2 预测结论

- 用 GGD 取代 GDP 作为经济最重要的评价指标，对促进全球 GGD 的增长效果显著。
- 对于每个国家来说，这种转变的影响是不同的，这与比率生命周期的阶段有关。
- 短期内，处于增长阶段的国家受益最大，其 ggdp / gdp 比率将开始快速上升。
- 从中期来看，考虑到阶段转型，更多的国家将进入新的阶段并从中受益，全球 GGD 将有显著增长。
- 长期来看，几乎所有国家都将处于成熟阶段。由于科技和社会的发展，比例上限可以继续提高，全球环保水平将迎来新的飞跃。

4 模型一:气候减缓评估模型

气候减缓是指旨在减少温室气体排放，从而减缓气候变化速度的努力。减缓气候变化涉及减少能源生产、运输、农业和森林砍伐等人类活动产生的温室气体排放量。可用于减缓气候变化的战略和技术有多种，例如增加可再生能源的使用和提高能源效率。在这里，我们建立了一个指标体系来衡量这种转变对减缓气候变化的影响。

4.1 建立 AHP 模型

4.1.1 评价模型的标准

一个国家或地区的气候减缓评估模型应满足以下要求:

- 评估模型具有普适性，可用于衡量任何一个国家或地区。
- 该模型应是全面的，涵盖减缓气候变化的各个方面。
- 选定的指标是可靠的和具有代表性的，它们之间没有重复。

4.1.2 指标选择

一个国家或地区在减缓气候变化方面的综合表现与许多因素有关，其中最重要的是污染排放，因为温室气体对大气有直接影响。人类的排泄物也可能对环境造成不可逆转的危害。除此之外，能源评估也是必要的，因为当一个国家的日常能源消耗中，清洁能源所占的比例越高，这个国家对减缓气候变化的贡献就越大。此外，科学和技术发展还可以帮助改善气候问题，拯救环境。与减缓气候变化有关的其他因素包括森林、政策和公众意识。

Level 1	Level 2	Description	Type
Greenhouse gas emissions	CGE	Total carbide gas emissions as Kt	-
	NGE	Total NOx Gas Emissions as Kt	-
Social	GS	Government spending on environmental protection, % of government spending	+
	PE	Public awareness of environmental protection, reflected through questionnaires	+
Nature Resources	FC	Forest cover as km ²	+
	EI	Energy self-sufficiency rate	+
	MDR	Mineral depletion rate	-
Technology	GHRC	Garbage handling and recycling capabilities	+
	CCC	Carbon capture capacity	+
Energy efficiency	BEE	Building energy efficiency	+
	IPEE	Industrial production energy efficiency	+
	VFE	Vehicle fuel efficiency	+
	FE	Fossil energy power generation, % of total power generation	-
Waste discharge	IW	Total amount of industrial waste generated as Kt	-
	CW	Total amount of civil waste generated as Kt	-
Note: +: The more benefit indicators,the better -: The better the lack of cost indicators			

图 5:气候减缓评估指标体系

基于上述描述，我们建立了一个 AHP 模型，并编制了 6 个主要因素，选择了 15 个衡量气候减缓的指标。

4.1.3 权重的计算

权重的确定对于评价指标的不同贡献至关重要。因此，采用两种加权模型来计算权重向量。

传统的层次分析法采用 GDM (Group Decision Method)来确定各指标的权重。这种方法需要专家给出各主要因素的比较矩阵。GDM 有其合理性，但也很主观。

熵权法(EWM)是另一种常用的加权方法。它假设分散程度越大，分化程度越大，可以导出的信息也就越多。因此，应该给指标赋予更高的权重，反之亦然[3]。

我们结合这两种方法来确定我们评估模型的权重，这既增加了可信度，又反映了我们对每个因素的重视程度。

•首先，我们使用 EWM 求出所有次级指标的权重。计算各一级指标的具体步骤如下。对于一级指标*k*，有*m*国家的二级指标*n*。

步骤 1，对于指标*i*，计算国家*j* 概率*p_{ij}*，其中*x_{ij}*为指标*i* 的国家*i* 的值。

$$p_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sum_{j=1}^m x_{ij}} \tag{3}$$

步骤 2，计算指标*i* 的熵值*E*_{*i*}。

$$E_i = \frac{\sum_{j=1}^m p_{ij} \cdot \ln p_{ij}}{m} \tag{4}$$

第三步，计算指标*i* 的权重*w*_{*i*}。

$$w_i = \frac{1 - E_i}{\sum_{i=1}^n 1 - E_i} \tag{5}$$

第四步，将每个二级指标的值按权重相加，得到一级指标的值*k*。

$$X_{kj} = \sum_{i=1}^n w_i \cdot x_{ij} \tag{6}$$

得到二级指标的权重后，我们就可以计算出每个一级指标。同样，我们得到了一级指标的权重向量。

•其次，我们使用 GDM 主观确定每个一级指标的权重。由三位专家对六个一级指标对气候减缓的重要性进行投票，具体步骤如下。

(1)不同因素之间的两两比较

三位专家投票比较主要因素的重要性。

温室气体>能源>废物排放>森林>科技~社会与政策(7)

(2)比较矩阵的计算

通过前面讨论的关系，我们得到了比较矩阵(*bij*)6×6 。

$$\begin{matrix} & F_1 & F_2 & F_3 & F_4 & F_5 & F_6 \\ \begin{matrix} F_1 \\ F_2 \\ F_3 \\ F_4 \\ F_5 \\ F_6 \end{matrix} & \begin{pmatrix} 1 & \frac{1}{3} & \frac{1}{5} & \frac{1}{7} & \frac{1}{9} & \frac{1}{9} \\ 3 & 1 & \frac{1}{3} & \frac{1}{5} & \frac{1}{7} & \frac{1}{7} \\ 5 & 3 & 1 & \frac{1}{3} & \frac{1}{5} & \frac{1}{5} \\ 7 & 5 & 3 & 1 & \frac{1}{3} & \frac{1}{3} \\ 9 & 7 & 5 & 3 & 1 & 1 \\ 9 & 7 & 5 & 3 & 1 & 1 \end{pmatrix} \end{matrix},$$

(3)一致性测试

我们可以在之前计算矩阵的特征值和特征向量。接下来，我们需要用最大特征值*λ**max*进行一致性检验。

$$CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} \tag{8}$$

$$CR = \frac{CI}{RI} \tag{9}$$

其中*n*= 6 时*RI*= 1.26。对于上述的比较矩阵，我们得到了:*R*= 0.044 < 0.1，因此比较矩阵是可以接受的。

(4)计算得到权重

一致性检验通过后，我们可以通过最大特征值对应的特征向量得到各主要因素的权重:温室气体(0.475)、能源(0.257)、废物排放(0.135)、森林(0.068)、技术(0.033)、社会与政策(0.033)。

•第三，我们将两组权重组合起来。利用最小相对信息熵原理，建立优化模型，使两种决策方法下结果的相对偏差最小化。

$$\begin{aligned} \min & \sum_{j=1}^n w_j (\ln w_j - \ln \alpha_j) + \sum_{j=1}^n w_j (\ln w_j - \ln \beta_j) \\ \text{s.t.} & \begin{cases} \sum w_j = 1 \\ w_j > 0 \\ j = 1, 2, \dots, n \end{cases} \end{aligned}$$

采用拉格朗日乘数法求解上述优化问题，得到了最终的权重:

$$w_j = \frac{(\gamma_j \alpha_j)^{0.5}}{\sum_{j=1}^n (\gamma_j \alpha_j)^{0.5}} \tag{10}$$

在下图中，我们展示了我们的评价模型的结果。左图反映了每个指标的权重，右图显示了我们评级体系中 10 个代表性国家在 2021 年的得分情况。

最重要的主要因素是温室气体排放。温室气体浓度的上升将直接导致地球温度的上升。全球变暖的主要原因是人类近一个世纪以来使用化石燃料(如煤、石油等)，排放了大量的温室气体如:CO2。而能源效率和自然资源也至关重要。

通过严格的计算，我们根据熵法和 AHP 获得了所有国家的综合权重得分。我们选择了代表每种情况的 10 个国家来显示得分。根据我们的评估结果，在减缓气候变化方面表现最好的国家是瑞士，得分为 0.72。

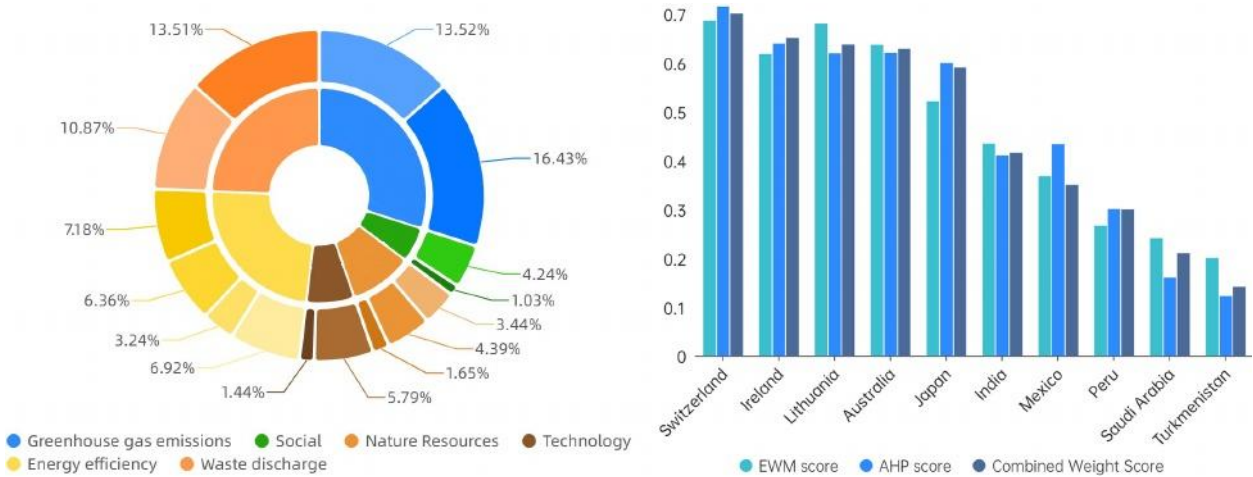


图 6:评估气候减缓的 AHP 模型

4.1.4 评估结果

对于 Task 2，我们需要使用之前的预测结果和评估模型来估计切换指标后对气候减缓的影响。在第 3.3 节中，我们预测了 GGDPG的发展。G的发展既涉及自然经济增长，也涉及政策冲击。在这一部分中，我们根据 ARIMA 的历史数据预测另一个 GGDPGdirectly。这意味着G只考虑了经济的自然增长，不受政策冲击的影响，这是G的反事实结果，因此，它们之间的差异反映了政策的效果。

$$\Delta G = \hat{G} - G \tag{11}$$

同时，根据我们之前的推导，GGDP 同时受到 GDP 和环境破坏的影响，政策的实施不会显著改变 GDP 的增长趋势。所以可以用治疗效应 ΔG 可以用来解释转换对环境损害的影响。

如前所述，环境破坏主要是由温室气体排放、火力发电、废物排放、资源破坏造成的，所以影响也可以分解为这四个方面。我们将这部分影响均匀地分布到这四个方面，这样就可以估算出二氧化碳减排、节电、减废、节约资源的价值。

最后，我们得到，如果在 2019 年发生转变($\Delta G= 10.6trillion\$$)，到 2050 年，全球可减少二氧化碳排放 4425 万吨，节约电力 2376.22 太瓦时，减少废物排放 7.898 亿吨。更重要的是，全球矿物、金属、化石燃料和生物质的消费量将减少 230 亿吨，原材料的回收率将从 8.6%提高到 19.7%。

我们将这些数值代入我们的气候减缓评估模型，其影响将在以下几个方面有利于全球的气候减缓：

- 这一转变最直接的影响是温室气体的大量减少。考虑由于温室气体对 GGDP 的巨大负面影响，企业和政府都会主动或被动地采取污染治理措施。我们计算出，到 2050 年，碳化物气体排放量将下降 27.61%，氮氧化物气体排放量将下降 49.71%。
- 各国政府将实施更严格的环保政策。此外，他们将大幅增加对环境保护的投资。按照指标权重计算，污染环境的企业将额外支付 300.00%的价格。公众环保意识也将提升，环境质量高的公民比例或将从 6.23%提升至 45.11%。
- 这一转变也将促进人类对森林资源的重视。我们估计，部分毁林地区(如亚马逊雨林等)的森林面积将停止负增长，到 2050 年全球森林面积将增加 4.00%，森林生态系统的健康度将增加 20.16%。
- 发达国家在碳捕集技术和废物处理技术方面将有跨时代的进步。不幸的是，这些技术对于大量发展中国家来说可能负担不起。即便如此，到 2050 年，全球垃圾处理量将上升到 35.55%。
- 建筑能效和工业生产能效均提升 10.13%。随着电动汽车技术的发展和燃油车的逐步淘汰，汽车燃油效率将提高 68.33%。同时，化石燃料发电将只存在于少数发展中国家。化石燃料在总能源中的份额预计将从目前的 80.79%下降到 27.86%。

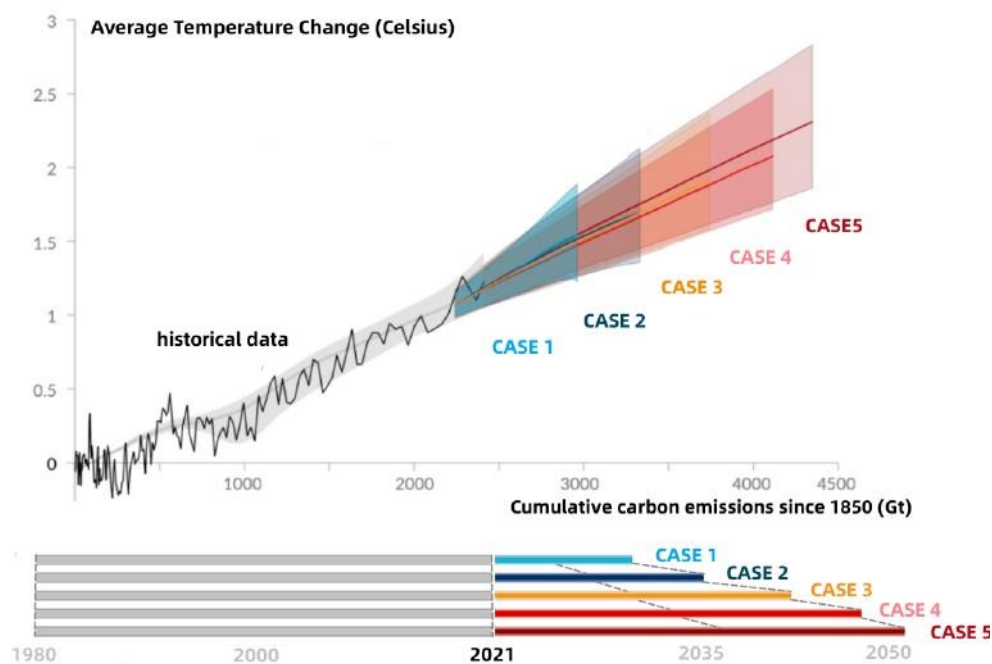


图 7:不同碳排放下的温度变化预测区间

综上所述，这一转变显著提高了 AHP 模型的所有六个维度，这将导致全球气候减缓得分显著提高 (44.18%)。如图 7 所示，根据 IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change，政府间气候变化专门委员会) 的研究，全球气温变化与碳排放直接相关。因此，这种转变也将有助于实现联合国提出的到 2050 年全球变暖幅度控制在 1.5 摄氏度的目标[4]。

5 模型二:全球影响的非线性规划模型

在 3.3.2 中，我们证明了随着时间的推移，这种转变对可持续发展的积极影响越来越大。在第 4 节中，我们详细分析了这种转变对减缓气候变化的影响。此外，在本节中，我们从更多方面描述了这种转变的全球影响，并分别分析了其进展和弱点。

5.1 生产要素的流动分析

分析一项政策的影响，也可以通过研究不同产业的发展来进行。用 GDP 取代 GGDP，会对高能耗、高污染的传统产业产生巨大影响。同时，也会极大地鼓励某些产业的发展，比如新能源产业。从全球来看，受损最严重的行业是制造业、运输业、能源业和采矿业，我们称之为转移的夕阳产业。受益最大的三个行业是服务业、科技产业和新能源产业，我们称之为朝阳产业。

考虑到资本和劳动力这两个最重要的生产要素，我们可以用它们的流动来分析转移对各个产业的影响。虽然所有产业的产值每年都在增加，但国家的发展会从夕阳产业向朝阳产业倾斜。从全球来看，受转移影响，资本和人口将从夕阳产业向朝阳产业转移，如下图所示。

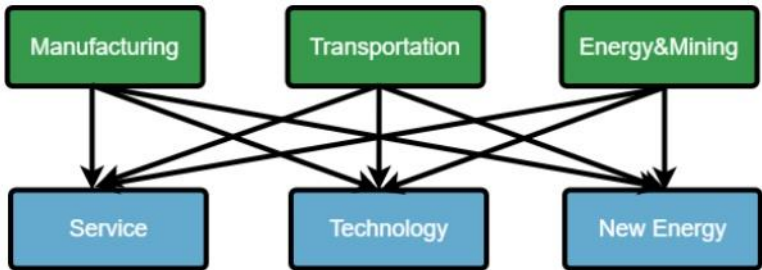


图 8:生产要素流动(Flow of Production Factors)

虽然发生了转移，但世界各国的短期发展目标仍然是总产值最大化。资本的总流动可以用 ΔG 来估算，因为 ΔG 不仅代表了环境破坏造成的价值损失，也代表了高污染、高能耗产业的损失。生产要素会流向其他产业。基于生产要素在产业间的流动关系，我们可以建立一个非线性规划模型。

5.2 生产要素流优化模型

在构建模型之前，我们需要做一些具体的假设：

- 我们只考虑资本和劳动力这两个生产要素。
- 受转移影响，生产要素将从夕阳产业流向朝阳产业，即朝阳产业。
- 这种流动发生在每年的年底。
- 每个行业都有劳动力负荷限制。
- 流完之后，每个行业都有固定的资本和劳动力年增长率。

每年的产值可以用道格拉斯生产函数来计算。对于每个行业，我们使用最近五年的数据来估计生产函数中的参数。

$$Q = A \cdot K^\alpha L^\beta$$

(12)

有了以上的规则，我们就可以建立一个流量优化模型。

表 2:非线性规划模型的注释

Symbol	Type	Definition
i	index	the index of sunset industries
j	index	the index of sunrise industries
x_{ij}	decision variable	capital flow from industry i to industry j in one year
y_{ij}	decision variable	labor flow from industry i to industry j in one year
Q_i	decision variable	total output value of industry i at the end of the year
E_i	decision variable	total labor of industry i at the end of the year
P_j	decision variable	total output value of industry j at the end of the year
F_j	decision variable	total labor of industry j at the end of the year
p_j	parameter	total output value of industry j at the beginning of the year
f_j	parameter	total labor of industry j at the beginning of the year
e_i	parameter	total labor of industry i at the beginning of the year
q_i	parameter	total output value of industry i at the beginning of the year
η	parameter	total capital flow due to shift
λ	parameter	industry labor fluctuation range coefficient
ω_i	parameter	annual output value growth rate of industry i
δ_j	parameter	annual output value growth rate of industry j
α_i	parameter	The first exponent of the Douglas production function of industry i
β_i	parameter	The second exponent of the Douglas production function of industry j
k	parameter	The annual growth grate of industry labor

$$\begin{aligned} \max \quad & \sum_{i=1}^3 A_i \cdot P_i^{\alpha_i} F_i^{\beta_i} + \sum_{j=1}^3 A_j \cdot Q_j^{\alpha_j} E_j^{\beta_j} \\ \text{s.t.} \quad & \begin{cases} \eta = \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 x_{ij} \\ P_i = (p_i + \sum_{i=1}^3 x_{ij})(1 + \omega_i), \quad \forall j \\ F_j = (f_j + \sum_{i=1}^3 y_{ij})(1 + k_{fj}), \quad \forall j \\ Q_j = (q_i - \sum_{j=1}^3 x_{ij})(1 + \delta_j), \quad \forall i \\ E_i = (e_i - \sum_{j=1}^3 y_{ij})(1 + k_{ej}), \quad \forall i \\ F_i \leq f_i(1 + \lambda), \quad \forall i \\ E_j \geq e_j(1 - \lambda), \quad \forall j \\ \text{all decision variables} > 0 \\ i, j = 1, 2, 3 \end{cases} \end{aligned}$$

是生产要素流动的年度决策模型。其结果基于各产业产值和劳动人口的变化。由于产业规模的扩大，劳动人口每年都会增加。因此，我们使用劳动人口的历史 5 年数据对其进行线性拟合，来估计人口增量。此外，在之前的模型中估计的每年的资本流动总量为ΔG。

在此基础上，我们运用我们的非线性模型对未来十年的产业发展进行估计，如下图所示的流程图。

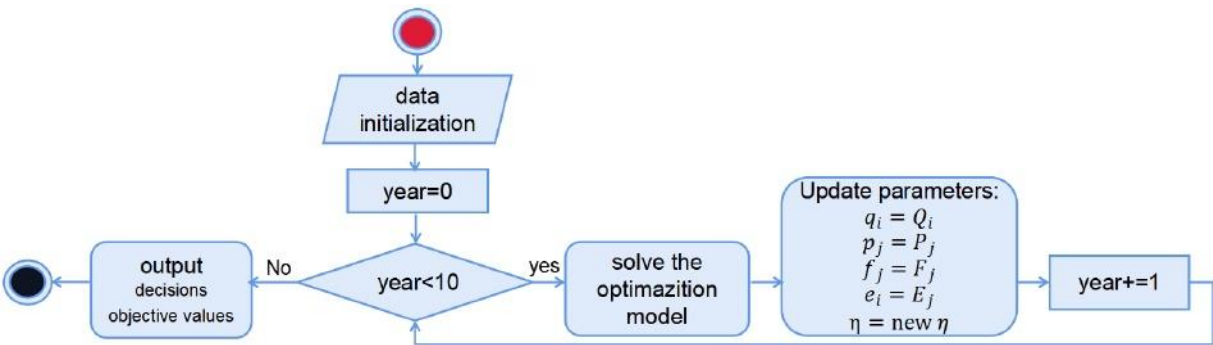


图 9:计算流程图

根据我们的模型结果，六大行业总产值的变化情况如下图所示。未移位的总产值是一个凸函数，增长主要由制造业决定。为了更好的观察，我们铺一条直线作为参考。发生移位后的解的结果如下图虚线所示。在短期内，总产值的增长低于参考线。这是因为生产要素转移到的朝阳产业在将生产要素转化为产值方面弱于传统产业。随着时间的推移，由于朝阳产业的年均增速明显高于夕阳产业，因此越来越接近基准线，未来有望超过基准线，体现出转移对长远发展的好处。

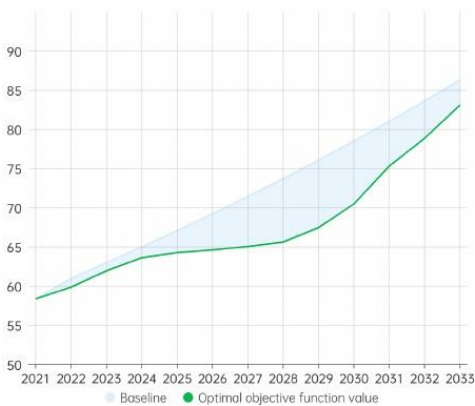


图 10:6 个行业的最优总产出

另外，各行业产值与劳动力的比值，对比十年后常规增长预测值，如下图所示。

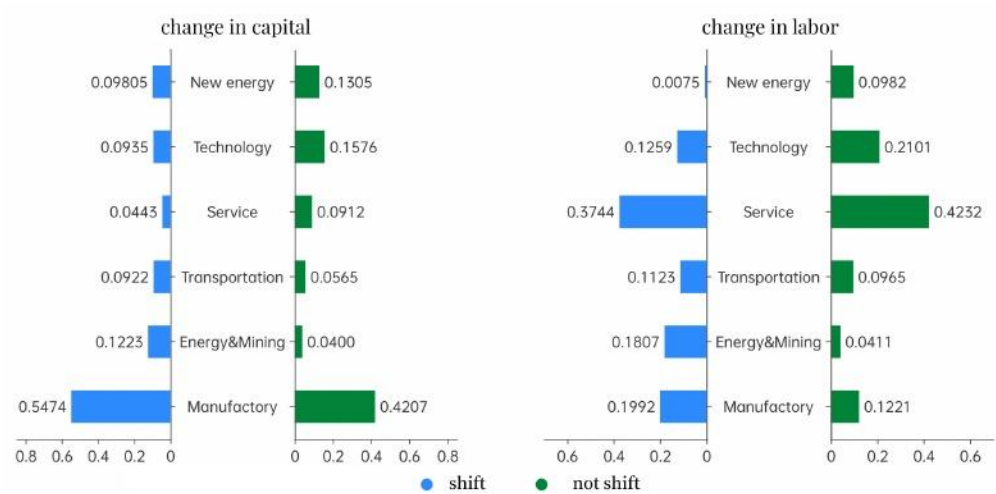


图 11:行业增长率变化对比

5.3 影响结果

通过生产要素流动的非线性规划模型，定量分析了转移的短期影响。

- 转移将对全球经济发展产生抑制作用，使六大产业总产值增速至少降低 5%。
- 产业转移对产值的影响因行业而异。其中，朝阳产业

如服务业、新能源、科技产业等有望增加 30.53%，而制造业、采矿业、运输业等夕阳产业预计减少 17.92%。

- 这一转变将导致劳动力在行业间的重新分配，可能造成大量失业，引发工人抗议。
 - 转移对某些行业的抑制作用会抑制经济的发展
- 依赖这些产业作为支柱产业的国家。

此外，这一转变还存在其他一些阻力。至于成本，将会造成巨大的行政成本。至于技术方面，要准确衡量环境损失是相当困难的。因此，可以推断，这种转变对于经济不发达国家来说是一个巨大的负担。

从长期来看，由于生产函数的参数随时间变化很大，不容忽视，因此我们定性地分析了转移的影响。

•长期来看，传统能源产业正在不断被新能源产业所取代。矿业在萎缩之后，已经达到了一个稳定的状态。高科技的发展可以缓解制造业和运输业对环境造成的破坏。全球产业优化升级已经完成，转移引领新一轮经济增长浪潮。

- 朝阳产业规模扩大，提供的就业岗位足以解决夕阳产业萎缩带来的失业问题。
 - 高科技突飞猛进，与此同时全球教育也得到了极大的提升。
 - 能源监管得到加强，打破了一些国家和地区对资源的垄断
- 促进全球公平。

这种转变可以改善未来世界各地人民的福祉。结合其减缓气候变化的意义，我们充分证明，这种转变在全球范围内是值得的。

6 案例研究:秘鲁如何在转变中生存

6.1 秘鲁简介

秘鲁是南美洲西部的一个国家，北与厄瓜多尔和哥伦比亚接壤，东与巴西和玻利维亚接壤，南与智利接壤，西与太平洋接壤。2021 年，秘鲁 GDP 达到 2247.25 亿美元，人均 GDP 为 6888 美元，经济增长率为 13.3%，通货膨胀率为 6.43%。2021 年，秘鲁的出口总额将达到 550.7 亿美元。其中，矿产品占外贸出口总额的比重超过 64%。

秘鲁有许多优良的矿产资源。例如，特罗莫克铜矿是世界上最大的铜矿之一，具有巨大的经济价值和发展前景。此外，秘鲁是世界上最大的矿产出口国之一。其中，铜矿石是其主要出口矿产之一。秘鲁和邻国智利几乎满足了该地区所有的铜矿开采需求。铜矿开发给秘鲁带来了巨大的经济效益和大量的就业机会。与此同时，不可避免的是，采矿业对自然环境有很多不可逆的影响，导致国家 GGDP 偏低。



图 12:秘鲁铜矿

6.2 转移对秘鲁的影响

根据我们的上述预测模型，秘鲁目前处于“初始阶段”，GGDP 与 GDP 之比较低且稳定(约 30%)。转型后，秘鲁的 GGDP 将进入“增长期”。根据我们的预测模型，比重在经历 20 年高速增长后趋于平稳，进入“成熟期”。图 13 显示了我们在秘鲁未来 30 年 GDP、GGDP 和国内生产总值/国内生产总值比率的预测。

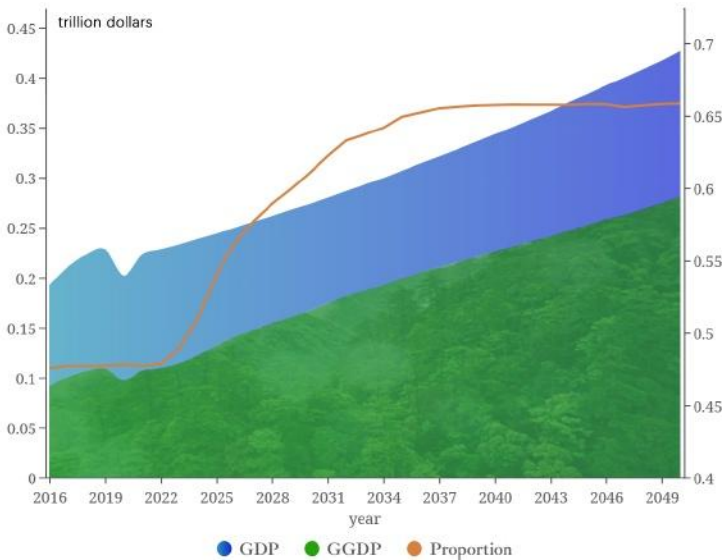


图 13:秘鲁未来经济主要指标预测

根据我们的 AHP 模型，换挡后，所有六个主要因素都将改善，气候缓解得分将提高 21.91%。与此同时，根据我们的规划模型，秘鲁的矿业和能源行业将出现大规模的资本和劳动力外流。资本和人员的流入主要针对的是服务业。考虑产业结构在秘鲁，秘鲁的采矿业受这一转变的影响最大。接下来，我们将有针对性地分析矿业是否要转型。

6.3 理性秘鲁博弈模型

这种转变是国家决策的政策因素。一旦换挡，国家将对矿产开采进行宏观调控和限制，这将对采矿业产生致命的影响。而且，这一重要决策通常是不可逆的。对于秘鲁和智利来说，选择转变是不合理的。用传统博弈论分析，会得出两国都不想放弃铜矿市场，继续维持两大寡头垄断的结论。由于实际情况的复杂性，我们可以用不同的智利决策来分析秘鲁的决策。

6.3.1 理性智利:完全信息下的静态博弈模型

没有秘鲁选择的信息，智利理性地选择了转变。如果此时进行转移，原有的市场份额将被智利吞并，从而改变原有均衡的寡头垄断地位。这将对秘鲁经济产生巨大影响，因为秘鲁将无法在短期内发展其他支柱产业。因此，理性的秘鲁会选择不移，两国之间的博弈是双寡头模式[5]。

在这个博弈中，两个参与方分别是秘鲁和智利，这两个国家生产同质产品，并竞争产量，所以他们的决定是每年铜矿产量。根据古诺竞争的结论，均衡产出为 $q^*=a-3c$ ，只与市场价格-需求函数和成本函数有关。

6.3.2 勇敢的智利:超级博弈论模型

勇敢的智利仍然在承担巨大风险的前提下进行转移，但这并不意味着智利会让秘鲁成为南美铜矿市场的霸主。于是智利选择与智利合作，也就是说服智利转移，结成联盟，从而共同控制铜矿价格，维护联盟利益。

在与秘鲁谈判达成协议后，秘鲁承诺与智利共同转移，采取减少铜矿产量的战略，并提高价格，从而保护联盟的经济利益。我们假设智利有很强的环保承诺，会遵守联盟的规则。此时，尚未采取任何行动的秘鲁面临着垄断铜矿市场的诱惑。在这一点上，秘鲁处于信息优势的一边，而智利处于信息劣势的一边。因此，建立了一个新的游戏，秘鲁可以选择合作或欺骗。由于秘鲁和智利之间的联盟关系是长期的，两国的具体政策每年都会发生变化，我们可以认为这个游戏是重复的，两国之间的信任会影响他们的战略。

考虑到信息不对称和博弈的重复，我们运用市场无序的超博弈分析来研究秘鲁的决策机制[6]。

为了简化分析，我们假设秘鲁在每个博弈中有两种选择，欺骗或合作。欺骗意味着违反联盟规定，采取高收益策略迅速吞并智利的份额，而合作则意味着遵守联盟规定甚至加入轮班。

在一个博弈中，如果秘鲁和智利都遵守联盟规则，这个结果被称为“合作解决方案”，假设秘鲁可以获得 π_{per} 年的利润 c 。反之，如果秘鲁通过信息优势欺骗智利，使得互惠原则被践踏，则此结果称为“欺骗解”，并假设秘鲁可以获得一次性利润 d 。显然，如果秘鲁和智利只有一次机会做出决定，作弊将是秘鲁的最佳策略。

然而，由于智利和秘鲁是南美洲仅有的两个铜矿寡头，他们的游戏不是一蹴而就的。二者之间的博弈需要反复进行。然而，由于第一次被秘鲁欺骗，智利将及时调整战略，即采取更加温和的可持续发展方式。为了保护国家利益，智利也将恢复铜矿的生产，重新进入市场竞争，在这种情况下，秘鲁的收益将受到影响，利润为 π_d 每年。

除此之外，我们还需要考虑时间因素。这个时间因素不仅反映了未来利润的折现，也反映了可持续发展对未来的影响。对应秘鲁的两种战略，时间因素为 μ_d 和 μ_c 。

由此得出，秘鲁选择合作的长期利润为

$$\Gamma_c = \frac{\pi_c}{1 - \mu_c} \tag{13}$$

秘鲁选择合作的长期利益是

$$\Gamma_d = \pi_d + \frac{\mu_d \pi_p}{1 - \mu_d} \tag{14}$$

如果违反联盟协议可能导致智利在其他方面对秘鲁实施制裁，或者秘鲁面临国际声誉的恶化，我们将这些额外损失作为惩罚因素考虑在内，秘鲁选择合作的条件是

$$\frac{\pi_c}{1 - \mu_c} \geq \pi_d - F + \frac{\mu_d \pi_p}{1 - \mu_d} \tag{15}$$

分析上述不等式，我们可以得到秘鲁在以下情况下可能选择合作。

- 时间因素 μ_d 将给秘鲁带来巨大的成本，即在未来，秘鲁将需要在环境恢复，产业转型等方面花费大量资金。
- 处罚 F 过大或 π_p 过小。秘鲁一旦选择欺骗，就可能受到国际组织的制裁或智利的威胁，造成不可估量的损失。
- 转移 μ_c 的时间因素将给秘鲁带来巨大的利益。秘鲁暂时愿意为未来发展牺牲利润。

6.4 秘鲁分析结论

通过前面的分析，我们认为秘鲁现阶段仍处于发展阶段，以牺牲环境为代价发展经济几乎是唯一的途径。因此，采取 shift 这样激进的环保战略，将面临巨大阻力。但为了可持续发展，发展，将经济转向稳定的未来将给秘鲁带来巨大利益，特别是在生态恢复和减缓气候变化方面。从比例生命周期来看，秘鲁目前处于婴儿期，未来的转变将使其进入成长期，GGDP 将快速增长。

对秘鲁来说，转型既是机遇，也是挑战，因此有必要采取谨慎的态度。一方面，国内环保政策需要逐步推进，避免冲击矿业、林业等支柱产业，阻碍经济发展;另一方面，迫切需要优化产业结构，布局新能源产业和服务业的发展，才能更好地受益于未来的转移。

在国际合作方面，秘鲁需要密切关注智利在换班问题上的立场，尽量不要先表态，以免成为信息劣势方。同时，尽最大努力与智利达成利益联盟，共同维护铜矿市场稳定和国家经济利益。秘鲁加强与发达国家的技术转让和知识共享，学习发达国家的环保经验和技术。

7 敏感性分析

当参数出现波动时，例如在非线性规划模型中，资金流总量增加，或者行业对人员的需求增加，模型结果会有相对的变化。因此，进行敏感性分析来评估模型。

我们已经分析了超博弈论模型中参数变化的影响，所以这里主要对模型 II 进行敏感性分析，主要考虑输入参数 η 和 λ 的估计。

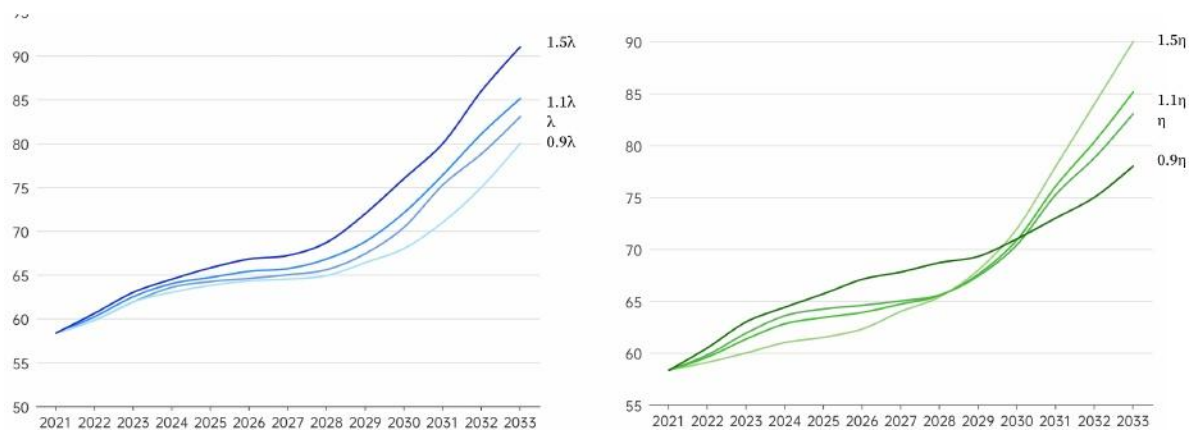


图 14:敏感性分析

从上面两张图中我们可以观察到 η 和 λ 的变化都影响了总产值，而且变化的方向是一致的。从下面两张图可以看出， η 和 λ 会影响生产要素的最优流动。 η 的主要收益体现在新能源产业和科技产业，而 λ 则改善了服务业。同时，各行业在参数变化时的整体变化趋势稳定。这些都表明，模型可以在保持敏感性的同时做出最优决策。

8 模型评估

8.1 优势

- 包容性和普适性我们的全球公平评估模型适用于衡量全球发展。
- 量化我们的模型通过指标量化气候减缓水平，并结合主观和客观方法计算权重。
- 创新我们创造性地建立了一个非线性规划模型来研究不同行业的变化。
- 耦合性所有模型都可以耦合在一起，计算结果可以转移相互之间。

8.2 缺点

- 准确性依赖于统计数据。我们的模型包含了大量的指标计算，因此得出的结果对数据的数量和准确性有很高的要求。
- 我们模型的计算过程相对复杂，运行一次需要大量的工作。
- 对于长期的影响，我们的模型缺乏定量的计算。

References

- [1] Stjepanovic, Sasa et al. "Green GDP: an analysis for developing and developed countries." *E & M Ekonomie A Management* 22 (2019): 4-17.
- [2] Maxim, Laura; Spangenberg, Joachim H.; O'Connor, Martin (November 2009). "An analysis of risks for biodiversity under the DPSIR framework". *Ecological Economics*. 69 (1): 12–23.
- [3] Nancy Fullman, Measuring performance on the Healthcare Access and Quality Index for 195 countries and territories and selected subnational locations: a systematic analysis from the Global Burden of Disease Study 2016, *The Lancet*, Volume 391, Issue 10136, 2018, Pages 2236- 2271, ISSN 0140-6736.
- [4] IPCC (2018). *Global Warming of 1.5°C: IPCC Special Report on impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels in context of strengthening response to climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty* (1 ed.). Cambridge University Press.
- [5] Vives, Xavier (October 1984). "Duopoly information equilibrium: Cournot and bertrand". *Journal of Economic Theory*. 34 (1): 71–94. doi:10.1016/0022-0531(84)90162-5. ISSN 0022-0531.
- [6] Yang Meizhi. Super game analysis of market disorder [J]. *Development Research*, 2011 (04): 118-120.

给秘鲁领导人的报告

秘鲁是一个自然资源丰富的国家，自然资源对其经济的贡献很大。然而，经济活动如果管理不当，可能会导致环境退化。

绿色 GDP 提供了一个更全面的经济发展观点，其中包括环境因素。根据我们从 GDP 向 GGDP 转变的数学模型，秘鲁目前处于绿色发展的初级阶段，即以经济发展为主要目标，对环境保护和可持续发展的重视程度不高。预计 20 年内，秘鲁将进入增长期，GGDP 将迎来快速发展。我们利用 15 项指标从 6 个方面分析秘鲁的气候减缓水平，发现其对世界的贡献低于平均水平，在效率和生态恢复方面需要提高。如果秘鲁能够进行转换改革，使秘鲁政府能够监测环境恶化，促进可持续发展，那么绿色发展将取得巨大进步，这将有助于保护子孙后代的生存家园。

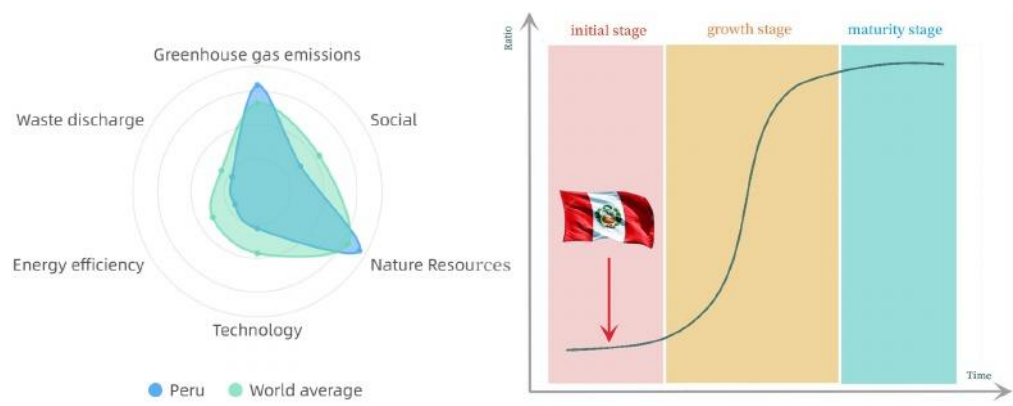


图 15:秘鲁与世界的指标比较及其在生命周期曲线上的位置

在经济方面，这种转变对工业发展的影响是复杂的。对于秘鲁来说，铜矿出口占 GDP 的比重很大，所以这种流动趋势在短期内不利于秘鲁的经济发展。此外，秘鲁还将面临人口失业问题，因为采矿业的萎缩将导致大量矿工下岗，而新能源产业和服务业的规模不足以提供足够的就业机会。

在国际关系方面，与秘鲁关系最密切的是智利，智利也是铜矿开采市场的寡头。秘鲁需要确保它不处于信息劣势。在观察智利的立场后，秘鲁才能衡量其当前的发展和长期利益，从而做出最优的应对。

结合秘鲁的国情和我们的分析，秘鲁必须在经济发展和环境保护之间寻求平衡，才能实现可持续发展。将绿色 GDP 作为国家发展的主要指标是一个重大的选择，但需要慎重考虑并逐步完善。我们建议秘鲁在保护环境的同时注重促进经济增长，并在未来经济进入稳定阶段时进行转变。