

双碳背景下的碳排放分析预测

摘要

在对双碳策略进行研究时，常依赖于多种外部因素的相关特性和变化规律，对情景假设下的碳排放量进行预测，从而为制定实现“碳达峰”“碳中和”的可行路径提供充分的理论指导。本文主要借助 Python、Excel、SPSS 进行计算。

对于问题一，本文首先根据国际能源署发布的中国各部门碳排放量清单，为后续模型建立初筛出 **5 种影响因素**，共 **10 个相关指标**，然后基于**拓展的 STIRPAT 模型**对碳排放影响因素和碳排放量之间的数学关系展开解释；接着引入**灰色关联度**对预处理后的数据进行分析，为每项影响因素保留关联度最高的一项指标作为代表，基于**岭回归**方法建立碳排放预测模型，消解多重共线性问题。针对模型所需数据对碳排放的影响因素进行模拟，代入岭回归模型，得到 2030 年、2060 年碳排放预测结果分别是 $16916 \times 10^6 \text{mt}$ 、 $14639 \times 10^6 \text{mt}$ 。

对于问题二，本文首先对占据市场份额较高的煤炭的高效开发和洁净化利用技术展开描述分析，比较中国已应用方案和各种技术方法，本文选用变压吸附捕集 CO_2 技术方案，计划在 2030 年实现该技术在工业中普及 10%，在 2060 年实现该技术在工业中普及 25%，并将计算得到的碳排放强度带入问题 1 模型，预测到 2030 年的碳排放量将降至 $13991 \times 10^6 \text{mt}$ ，而到 2060 年将降至 $9846 \times 10^6 \text{mt}$ ，与当前水平相比，分别实现了 **17.29%** 和 **37.24%** 的显著降低。

对于问题三，本文基于近 20 年我国洁净能源消耗占比的数据面板，可视化描述出不同洁净化能源的发展趋势，并结合政策对能源做出逐一说明。本文选择大力发展生物质能发电作为替代方案，充分考虑不同地区之间差异，逐步推进方案实施，得到**未来 50 年的发电量**预测如图6；在此基础上，本文综合考虑生物质能的替代与吸收作用，将改变的参数代入岭回归模型，得到 2030 年、2060 年碳排放预测结果分别是 $14648 \times 10^6 \text{mt}$ 、 $14100 \times 10^6 \text{mt}$ 。

对于问题四，本文引入提高森林覆盖率，提升碳汇能力的方案，结合国家政策，提出了优化森林管理策略，通过系统动力学模型模拟不同的森林管理策略来评估和优化这些策略的效果，从而制定有效的植树造林和森林保护计划。我们在中国森林数据的基础上，做出 50 年的情景假设，得到图9，得到二氧化碳浓度降低 20 个 ppm，净吸碳量提升 8MT，证实了方案的可行性。

最后，本文参照在预测与分析中各项策略的表现、实际经验认知、环境领域相关政策文献，从技术路径的角度向相关能源管理部门提出书面建议。其一，继续加大**技术创新和研发**的支持力度；其二，持续推动**能源结构转型升级**；其三，建立**跨部门合作机制**，实现区域协同发展。

关键字： 碳排放 双碳 STIRPAT 模型 灰色关联度 岭回归

一、问题重述

1.1 问题背景

气候变化是人类面临的一项紧迫的全球性问题。作为负责任的大国，中国已经对此提出了“碳达峰”“碳中和”的目标。深入研究我国二氧化碳排放的主要来源、变化规律以及多种减排技术的应用，不仅能够为制定有效的减排政策提供科学依据，还能推动清洁能源的发展。对实现“碳达峰”和“碳中和”目标、促进我国生态文明建设和可持续发展具有重要意义。

1.2 问题要求

问题基于问题一层层递进，并且服务于同一主题——中国实现碳达峰和碳中和目标的策略与预测。

问题 1 探讨中国碳排放的主要源头，结合人口增长与经济增长等变量，构建数学模型对“碳达峰”“碳中和”时期的碳排放量展开预测；

问题 2 研究提高煤炭开采效率和清洁利用的技术途径，分析这些技术如何助力减排，并预测自 2023 年起采纳这些技术后，实现“碳达峰”“碳中和”目标时中国的二氧化碳排放量；

问题 3 考察中国在核电、水电、太阳能、风能、生物质能、氢能等清洁能源领域的发展趋势，评估这些能源替代化石能源后，未来半个世纪的电力产量，以及从 2023 年起采纳清洁能源策略后，碳达峰”“碳中和”目标达成时的二氧化碳排放量预测；

问题 4 提出新的减排策略，并构建模型来分析其对减少二氧化碳排放的有效作用；

问题 5 基于模型分析结果，探讨中国实现碳排放峰值和碳中和目标的潜在技术路线，并形成文字报告。

二、问题分析

本题以我国“双碳”战略目标为背景，全面综合多种影响因素，在不同情景假设下，完成“碳中和”“碳达峰”时期的碳排放量预测问题。

2.1 问题一分析

问题一是本问题的解题基础，综合考虑碳排放相关因素，实现基于情景分析法的碳排放预测。题目要求我们搜寻大量数据，分析我国二氧化碳排放的主要来源，通过各部门碳排放量清单对数据因素进行分类和初筛。考虑到各种影响因素影响的程度不同，对

其采用关联度分析，筛选出主要因素，构建回归模型得到计算公式。基于“双碳”战略背景展开情景模拟，预设样本外重要因素的值，从而完成对 2030、2060 两个时间点碳排放的预测。

2.2 问题二分析

问题二可以分为两步逐一求解。首先针对煤炭的高效开发和洁净净化利用技术展开评估，得到可行的技术方案；其次，使用情景模拟，改变相关参数，应用回归公式，得到技术应用背景下的排放预测。同时，为了了解所选技术方案在减碳目标下的优越性，将技术应用前后的碳排放量作对比，得到二氧化碳减少的排放量的预测。

2.3 问题三分析

对于问题三，首先通过近 20 年我国洁净能源的比例和占比变化，对不同洁净能源发展趋势展开分析；考虑现实社会背景和环境需求，给出合适的能源替代方案，根据所选方案和能源的发展的分析，通过，对未来 50 年的发电量展开预测。最后，在该能源替代方案的情景假设下，改变相关参数，应用回归公式，得到对于 2030 年、2050 年的碳排放量预测值。

2.4 问题四分析

对于问题四，这是一个较为开放的分析，可以根据前三问的分析结果，考其他的影响因素进行情景假设分析，综合评估方案的可行性和减碳方向的有效性。

本文研究路径如图1：

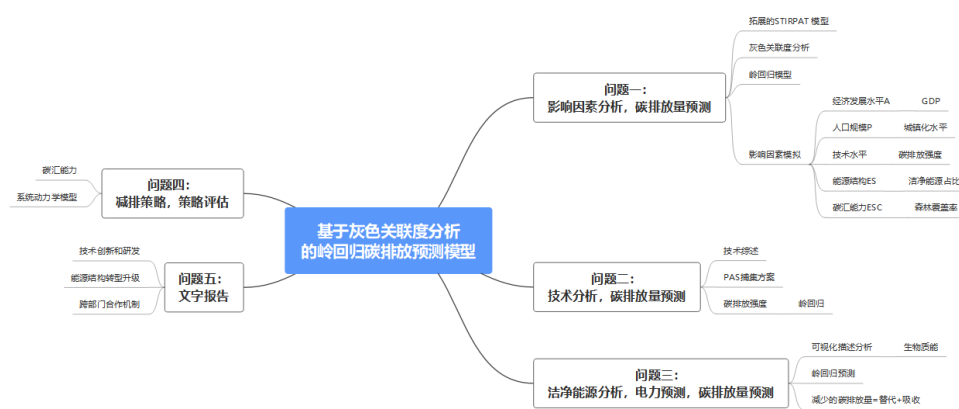


图 1 研究路径

三、模型假设

为简化问题，本文做出以下假设：

- 假设 1 假设忽略其他未纳入模型建立的影响因素的影响
- 假设 2 假设自 2021 年起，政策背景建立在双碳政策下，没有明显变化。

四、符号说明

表 1 符号说明

符号	说明	单位
I	环境污染程度（碳排放量）	mt
A	经济发展水平	亿元
P	人口规模（城镇化水平）	%
T	技术水平（碳排放强度）	1
ES	能源结构（洁净能源占比）	%
ESC	碳汇能力（森林覆盖率）	%

五、问题一的模型的建立和求解

5.1 数据说明

本文选择 2004-2022 年相关数据，通过中国分部门核算碳排放清单数据对影响因素进行初筛，分为 5 类，10 个具体指标。指标构成如下表2所示，数据来源由表3所示。

表 2 碳排放影响因素指标构成

影响因素	指标构成
经济发展水平	国内生产总值（GDP）、人均 GDP
人口规模	总人口数量、城镇化水平
技术水平	碳排放强度（每单位能源生产所排放的二氧化碳量）
能源结构	清洁能源消费占比、煤炭消费占比
碳汇能力	森林覆盖率、城市绿地面积

表 3 数据来源

数据名称	相关指标	数据来源	链接
碳排放数值	碳排放总量 (mt)	China - Countries & Regions - IEA	https://www.iea.org/countries/china
经济发展水平	国内生产总值 (GDP)、人均 GDP	国家统计局	https://www.stats.gov.cn/
人口规模	总人口数量、城镇化水平		
技术水平	碳排放强度	CEADs 中国碳核算数据库	https://www.ceads.net.cn/
		Statista	https://www.statista.com/
能源结构	清洁能源消费占比、煤炭消费占比	China - Countries & Regions - IEA	https://www.iea.org/countries/china
碳汇能力	森林覆盖率、城市绿地面积	国家林业和草原科学数据中心	https://www.forestdata.cn/

5.2 基于拓展的 STIRPAT 模型的碳排放影响因素解释

为研究环境影响与人类活动、富裕程度和技术水平之间的关系, Ehrlich 等提出 IPAT 模型 [1], 分析环境问题和制定环境政策提供了一个简单的框架。

$$\text{Impact}(I)=\text{Population}(P)*\text{Affluence}(A)*\text{Technology}(T) \quad (1)$$

在此基础上, 为引入更多因素, 充分考虑因素之间的相互作用, 提供更精细的统计结果, York 等发展出 STIRPAT 模型 [2], 将人口、经济发展、技术水平影响因素纳入环境影响的贡献量化中:

$$I = aP^bA^cT^d\varepsilon$$

其中, a, b, c, d 为模型的参数, I 代表环境污染程度, P 代表人口规模, A 代表经济发展水平, T 代表技术水平, ε 为随机误差项。

在该问题背景下, 本文在其模型基础上扩充碳排放影响因素集, 引入**能源结构** ES 、**碳汇能力** CSC , 增加对中国碳排放更完善的宏观因素考虑, 构建以下数学模型:

$$I = aP^bA^cT^dES^fCSC^g\varepsilon$$

通过对该模型进行对数线性化, 可以转化为线性回归形式:

$$\ln I_i = \ln a + b \ln P + c \ln A + d \ln T + f \ln ES + g \ln CSC + e \quad (2)$$

5.3 基于灰色关联度分析的指标选择

5.3.1 数据预处理

本文将 2004~2022 年 10 个指标的数据作为输入参数汇总到同一张数据表中，通过代码观察分析，发现 2022 年存在数据项的缺失值，选用线性插值法，保留数据本身的趋势与波动，将空缺值填补完整。

在进行灰色关联度分析之前，考虑到不同指标的单位与数量级差异过大，为消除不同量纲的数据带来的影响，本文对数据进行了归一化处理，将不同量纲的数据映射到统一的范围内，确保后续灰色关联度分析中各指标数据在同一尺度上进行比较。本文采用如下归一化处理方法：

$$x_i^* = \frac{x_i - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}} \quad (3)$$

其中， x_i 为初始输入数据， x_i^* 为归一化之后的数据， x_{\min} 为影响因素数据序列中的最小值， x_{\max} 为序列中的最大值。

5.3.2 影响因素识别

为去除多余因素对模型预测的冗余影响，通过评估系统因素之间关联程度筛选每个影响因素中的最主要指标作为代表。考虑到选取的数据样本量较小，引入灰色关联度分析，比较序列之间的相似性和差异性来确定系统因素之间的关联程度。

本文选择碳排放总量（即环境污染强度）作为重要的参考序列 X ，而选取的 10 个需要与参考序列进行比较的指标（国内生产总值、人均 GDP、年末总人口、城市人口占比、碳排放强度、煤炭占能源消费总量的比重、清洁能源占比、工业能源占比、森林面积、森林覆盖率）则作为比较序列 Y 。

$$\begin{aligned} \mathbf{X} &= (x_i(0), x_i(1), \dots, x_i(19))^T \quad i = 1, 2, \dots, 10 \\ \mathbf{Y} &= (y(0), y(1), \dots, y(19)) \end{aligned} \quad (4)$$

根据灰色系统理论，使用以下公式计算灰色关联系数 [3]：

$$\xi_i(k) = \frac{\min_i \min_k |x_0(k) - x_i(k)| + \rho \max_i \max_k |x_0(k) - x_i(k)|}{|x_0(k) - x_i(k)| + \rho \max_i \max_k |x_0(k) - x_i(k)|} \quad (5)$$

其中， $x_0(k)$ 为参考序列在第 k 个时间点的值， $x_i(k)$ 为第 i 个比较序列在第 k 个时间点的值， ρ 是分辨系数，本文将其取值为 0.5，在较大和较小差异之间达到一个较好的平衡。

通过对所有时间点的灰色关联系数取平均值，计算出了不同指标的灰色关联度：

$$\gamma_i = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \xi_i(k) \quad (6)$$

其中， γ_i 是第 i 个比较序列的灰色关联度， n 是时间点的数量。
通过分析计算得到了各比较序列与参考序列之间的灰色关联度，结果如下：

表 4 灰色关联度结果

国内生产总值	人均	总人口数量	城镇化水平
0.610057	0.608417	0.598144	0.654883

碳排放强度	清洁能源消费占比	煤炭消费占比	森林覆盖率	城市绿地面积
0.702410	0.702410	0.529807	0.673987	0.537378

对表4的结果进行排序分析可知，碳排放强度指标和参考序列碳排放总量关联度最高，煤炭占能源消费的比重关联度最低，在五个影响因素大类中分别选取关联度最高的一项指标作为代表，选取的指标如表5所示。

表 5 指标选择结果

影响因素	选择指标	含义	单位
经济发展水平 A	国内生产总值（GDP）	年度国家经济活动的总量	亿元
人口规模 P	城镇化水平	城市人口占总人口的比例	%
技术水平 T	碳排放强度	每单位能源生产所排放的二氧化碳量	1
能源结构 ES	清洁能源消费占比	清洁能源在能源消费结构中的比例	%
碳汇能力 ESC	森林覆盖率	森林面积占国土面积的比例	%

5.4 基于岭回归的碳排放量预测模型的建立与评估

在已有相关因素数据的支撑下，我们建立回归模型对碳排放量展开预测。
Step 1 考虑到不同影响因素之间可能存在较高的相关性，影响模型的预测效果。我们首先对影响因素进行多变量线性回归，发现 VIF 大于 5，说明变量之间存在多重共线性2。

模型		系数 ^a					
			标准系数 Beta	t	显著性	共线性统计 容差	VIF
1	(常量)	1.885	3.570	0.528	0.606		
	国内生产总值(亿元)	0.725	0.187	1.791	3.880	0.002	383.967
	城市人口占比	-0.271	0.938	-0.156	-0.289	0.777	525.434
	碳排放强度	-1.635	0.504	-0.151	-3.241	0.006	3.925
	清洁能源占比	-0.474	0.175	-0.639	-2.706	0.018	100.377
	森林覆盖率	0.120	0.282	0.043	0.425	0.678	18.261

图2 多重共线性

Step 2 鉴于自变量间的存在多重共线性，我们选择引入岭回归模型，在普通最小二乘回归的损失函数中添加一个惩罚项来调整模型的复杂度，从而减少变量之间的相关性对模型的影响，从而达到在保持模型预测能力的同时，降低模型对数据中噪声的敏感度的目标 [4]。

Step 3 在数据准备完毕后，考虑到前期工作已经标准化特征值，我们直接将数据集划分为训练集和测试集（比例为 4:1），用于建立岭回归模型。

Step 4 通过交叉验证进行选择最佳岭回归模型的参数 $\text{Alpha} = 0.01$ ，并使用 RidgeCV 进行参数调优，平衡模型的偏差和方差，并绘制岭迹图，展示出不同正则化参数下各个特征的系数变化情况，如图3，并得到最终参数，如表6；

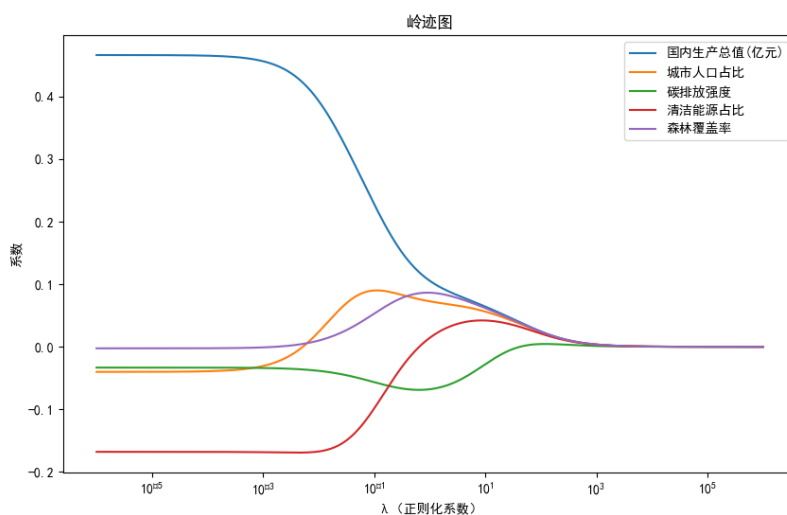


图3 岭迹图

表 6 参数结果

参数	b	c	d	f	g	Intercept	Alpha
值	0.023837196	0.39263255	-0.038442645	-0.167265244	0.009921828	Intercept	0.01

Step5 模型建立完成后, 使用计算均方误差 (MSE)、均方根误差 ($RMSE$)、决定系数 (R^2) 和平均绝对误差 (MAE) 等指标对模型进行评估见表7; MSE 接近于 0, 展现了模型良好的预测效果。 R^2 为 0.87, 说明模型能够很好地捕捉到数据的变化趋势, 具有不错的拟合效果。

表 7 模型评估结果

MSE	RMSE	R^2	MAE
0.000208813	0.0144503917	0.996348599	0.010900596

Step 6 将模型预测应用于整个数据集中, 通过可视化散点图展现优越拟合效果:

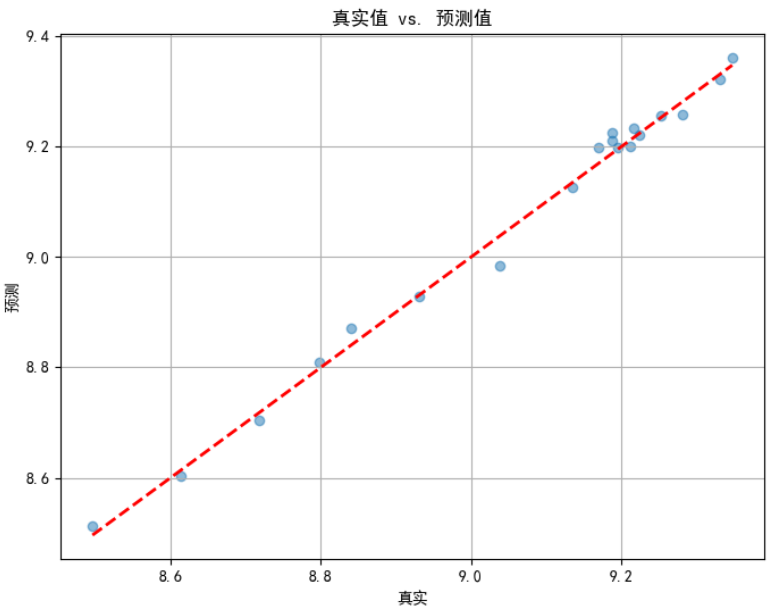


图 4 预测数据拟合效果

5.5 碳排放影响因素模拟

a. 经济发展水平：国内生产总值 (GDP)

党的十九届五中全会指出 [5], 我国计划 2035 年人均 GDP 跻身中等发达国家水平, 即人均 GDP 达到 2.5 万美元。如果未来 12 年匀速发展, 中国年均 GDP 增速需要达到 4.7%。

本文设定 2023~2035 年中国年均经济增速服从均值为 5%, 标准差为 0.3% 的正态分布。2035~2060 年中国年均 GDP 预期增长率服从均值为 3%, 标准差为 0.1% 的正态分布。

使用蒙特卡洛模拟进行了一万次模拟得到 2030 年中国 GDP 预测均值为 1779836.57 亿元, 2060 年中国 GDP 预测均值: 3838165.59 亿元。

b. 人口规模：城镇化水平

根据《“十四五”新型城镇化实施方案》[6] 显示, “十三五”规划期间, 中国着力推进新型城镇化, 取得显著进展, 城镇化水平和质量大幅提升。2020 年, 全国常住人口城镇化率已达到出色的 63.89%。“十四五”规划主要目标保持政策支持力度, 稳步推进城镇化率。城镇化率 30%—70% 一般被认为是城镇化快速发展区间 [7], 1996 年, 中国的常住人口城镇化率首次达到了 30.48%, 标志着城镇化快速发展历程的开始。经过 20 多年的发展, 这一数字正逐步接近 70%, 故城镇化率提升幅度较前期将有所放缓。根据《城市蓝皮书：中国城市发展报告 No.12》[8] 的预测, 2030 年中国城镇化率有望突破 70%。《中国 2014 战略》[7] 中提到城镇化的平衡点为 75%~80%。2035 年后, 增长减缓, 2060 年达到 80% 的城镇化率。

c. 技术水平：碳排放强度

结合统计学和时间序列分析的技术, 运用 ARIMA 模型, 预测碳排放强度的变化。**Step1** 通过单位根检验 (ADF 检验) 确认该时间序列数据非平稳性。**Step2** 对原始数据进行差分操作, 使其达到理想平稳性。**Step3** 通过观察差分后的时序图以及自相关函数 (ACF) 和偏自相关函数 (PACF) 图, 确定 ARIMA 模型的参数。其中, 自相关函数图可用于确定滞后阶数 q , 偏自相关函数图可用于确定自回归阶数 p 。在确定差分次数 $d=1$ 后, 选择合适的 p 和 q 值 ($p=3$ & $q=3$) 拟合 ARIMA 模型, 并使用拟合好的模型进行未来碳排放强度的预测。**Step4** 将预测结果映射到未来时间范围, 以获取预测值。最终得到 2030 年的碳排放强度为 196.45%, 2060 年的碳排放强度为 190.71%。

d. 能源结构：清洁能源消费占比

《2030 年前碳达峰行动方案》[9] 指出, “十四五”期间, 我国将大力推行能源结构调整政策, 使得产业结构和能源结构调整优化取得明显进展; “十五五”期间, 将初步建成清洁低碳安全高效的能源体系, 落实重点领域低碳发展模式, 向国际先进水平靠齐。

碳中和发展研究院 [10] 依托国内外 16 个机构预设的 33 种不同假设情景, 对“碳达峰”“碳中和”背景下中国能源需求展开预测, 到 2030 年, 清洁能源消费比重可达到 20% 左右, 2060 年达到 80%。

e. 碳汇能力：森林覆盖率

根据《2030 年前碳达峰行动方案》[9] 指示，我国将深入推进大规模国土绿化行动，提高生态系统对二氧化碳的吸收能力，我国森林覆盖率增长速度将有效提高。第九次全国森林资源清查数据 [11] 显示，2018 年我国森林覆盖率达到 23%，同比增长 1.3 个百分点，预计到 2030 年，我国森林覆盖率将达到 25%。我国生态修复政策持续推行，生态系统质量不断改善，将在未来 30 年里保持平稳增长态势，根据科学的路径制定，2060 年中国森林覆盖率预计达到 27%。

表 8 影响因素模拟结果

影响因素	指标	2030 预设值	2060 年预设值	单位
经济发展水平 <i>A</i>	国内生产总值 (GDP)	1779836.57	3838165.59	亿元
人口规模 <i>P</i>	城镇化水平	70.00%	80.00%	%
技术水平 <i>T</i>	碳排放强度	196.45%	190.71%	1
能源结构 <i>ES</i>	清洁能源消费占比	20%	80%	%
碳汇能力 <i>ESC</i>	森林覆盖率	25%	27%	%

5.6 碳排放预测结果

使用 5.3 建立的岭回归模型，运用 5.4 中模拟出的参数数据进行预测，并输出预测结果，展示了 2030 年和 2060 年的预测碳排放总量见表9。

表 9 双碳背景下的碳排放预测值

年份	碳排放量 (*10 ⁶)	单位
2030	16916.06081	mt
2060	14639.40051	mt

六、 问题二的模型的建立和求解

6.1 煤炭的高效开发和洁净化利用技术分析

通过大量文献阅读，本文发现随着全球对于碳排放的关注度增加，各项减排技术迎来迅猛发展，从处于的工业开发流程来看，技术可以分为高效开发领域的前期处理和洁净化领域的后期吸收，以下将从两个板块分别对各项技术展开详细的分析：

6.1.1 高效开发

- 煤炭洗选技术

煤炭洗选技术是指通过物理、化学或微生物的方法，将原煤中的杂质（如矿物质、泥沙、硫等）去除或减少，提高煤炭的质量和利用价值的过程。洗选后的煤炭可以等量释放更多的能量，同时减少燃烧过程中污染物的排放。

- 煤炭气化技术

煤炭气化技术是一种将固体煤炭转化为可燃气体的热化学过程，相比较于原煤，这些气体可以更高效地用于发电和供热，实现更高的能源转换效率。同时这一技术可以结合清洁燃烧技术，在排放缓解也达到不错的减排效果。

6.1.2 洁净化利用

- 低氮燃烧技术

该技术主要应用于工业锅炉、加热炉、燃气轮机以及内燃机等设备，以降低其排放的氮氧化物对环境的影响，包括使用低氮燃烧器、炉膛空气分级、烟气再循环、燃料与空气分级、浓淡燃烧、催化还原以及 *MILD* 燃烧等方法。[12] 随着数值模拟技术的发展，多技术协同作用和富氧燃烧等新型方法不断涌现，推动了低氮燃烧技术向更高效、更环保的方向发展。

- 烟气脱硫技术、烟气脱硝技术

作为两种主要的工业烟气净化技术，它们采用不同的化学物理方法，针对工业排放废气中的硫氧化物、氮氧化物进行去除。随着全球对碳排放的关注增加，这两项技术正逐步朝着实现数字化和智能化的方向发展。

- 超临界或超超临界锅炉

超临界锅炉和超超临界锅炉代表了电站锅炉技术的先进水平，它们通过提高蒸汽的压力和温度超过水的临界点来提高发电效率。它们通常采用没有锅筒的直流锅炉设计，提高燃烧效率，减少单位能量产出的燃料消耗和排放，对环境影响较小。

- 碳捕集与封存 (CCUS)

CCUS 技术是实现全球“双碳”目标——即碳达峰和碳中和目标的关键性技术 [13]，中国作为世界上最大的 CO_2 排放国之一，CCUS 技术可用于从我国工业源和能源产业中捕集 CO_2 ，然后将其进行提纯、运输，并最终储存或利用，以减少温室气体排放并应对全球气候变化，对于实现国家的碳减排承诺具有重要的战略意义。

6.2 技术方案的选取和碳排放值的预测

比较中国已应用方案和各种技术方法，本文选用一种碳捕集与封存技术。中国碳捕集与封存技术已经有应用到生产中的实例，实际工业示范中，以烟道气低浓度 CO_2 捕

集为主，主要采用吸收式捕集，但其存在流程较复杂、吸收药剂腐蚀性较强和再生能耗较高等问题。因此，我们选择了一种低浓度 CO_2 捕集技术——变压吸附捕集 CO_2 变压吸附（Pressure Swing Adsorption, PSA）捕集 CO_2 的原理是利用 CO_2 与混合气体中的 N_2 、 O_2 、 CH_4 、 H_2O 和 CO 等气体在吸附剂介质中的结合力和吸附容量的差异来实现分离。吸附剂和气体分子之间的结合力是范德华力，这种力较弱，因此吸附热也较低。PSA 方法利用吸附剂对 CO_2 吸附容量随压力升高而增加、随压力降低而减小的特性，在高压下吸附 CO_2 ，在低压时解吸释放 CO_2 ，从而实现吸附剂的再生。PSA 捕集 CO_2 无需再生热源，只需通过压力变化即可完成，因此能耗较低。此外，由于不使用液体吸收剂，PSA 不会造成二次污染，对环境友好。该工艺设备简单，易于实现自动控制，具有工业化的优势。针对吸附剂的选择，本文比较了不同吸附剂对 CO_2 的吸附量，最终选择 MIL-101 (Cr) 作为本方法中的吸附剂，PAS 捕集参数如10:

表 10 PAS 捕集参数

PAS 捕集效率	再生能耗	捕集后 CO_2 纯度
90%	0.4MT/Kg CO_2	95%

我们将通过如下步骤，计算新的碳排放强度参数：

Step1 统计该方案下的捕集量：

$$C_{\text{捕}} = E_{\text{捕}} * \text{捕集效率} \quad (7)$$

Step2 通过与原排放量做差，得到捕集后排放量：

$$E' = E_{\text{排}} - C_{\text{捕}} \quad (8)$$

Step3 在原能耗的基础上，计算再生能耗导致的额外排放量：

$$\text{再生能耗量} = C_{\text{捕}} * \text{再生能耗} \quad (9)$$

$$\text{再生能耗导致的 } CO_2 \text{ 排放量} : C' = \text{再生能耗量} * \gamma \quad (10)$$

$$\gamma = \frac{CO_2 \text{ 排放量}}{\text{每单位 MT 能量}} \quad (11)$$

Step4 将两者做和，计算出总排放量：

$$E_{\text{总}} = E' + C' \quad (12)$$

Step5 将总排放量与能源总生产量做比映射得到捕集后的碳排放强度：

$$I_{\text{捕集后}} = \frac{E_{\text{总}}}{P} \tag{13}$$

$$P = \text{总能源生产} \tag{14}$$

本文计划在 2030 年实现该技术在工业中普及 10%，在 2060 年实现该技术在工业中普及 25%。将上述情景结合计算方法得到碳排放强度后带入问题 1 模型后得到以下数据。

表 11 技术方案推广后的碳排放预测值

年份	碳排放量 (*10 ⁶)	碳排放量降低率	单位
2030	13990.96840	17.29%	mt
2060	9846.07295	32.74%	mt

七、 问题三的模型的建立和求解

7.1 洁净能源发展趋势分析

全球对能源的需求不断增长，同时环境保护的要求也越来越高。传统的化石燃料对环境造成了严重污染，温室气体的排放引发了全球气候变化问题。洁净能源，包括水电、风能、太阳能、生物质能和地热能，因其低碳、环保的特性，逐渐成为全球能源转型的重要方向。根据国际能源署 2022 年公布的数据，得到中国 2000~2021 年 20 年内不同清洁能源的发电量，可视化发展趋势如图5。

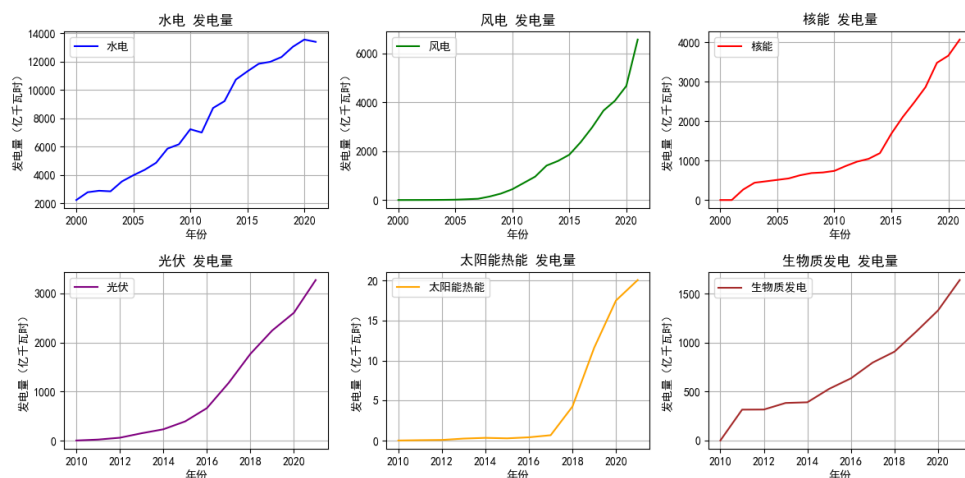


图 5 洁净能源发展趋势

以下将结合政策等对能源做逐一说明：

7.1.1 核电

核电是一种高能量密度、高稳定性且低碳排放的洁净能源，在我国能源供应中占据着重要的比例。在过去两年，我国每年约核准 10 台核电机组。核电景气度不断攀升，复兴趋势强盛，过去十年间，我国核电发电量总体增长 400%，达到了 4177.8 亿千瓦时 [14]。

但由于历史事故其潜在的危险性和技术限制等原因，核电发展受到了一定阻碍。受政策因素限制，每年核电发电量的增长速率几乎无法改变。

7.1.2 水电

水电是除了火电发电外我国发电占比最大的能源。过去十年间，我国市场对于水电的消纳情况不断改善，装机容量稳步增长，设备利用率持续提高，发电量占比也随之不断增长。从 2012 年的 8555.52 亿千瓦时到 2022 年的 12020.00 亿千瓦时，十年间，水电发电量的年均复合增长达到了 3.14% [15]，展现了稳定且持续提升。

同时，由于长久稳定的发展，水电能源发展潜力减小，水电能源发电量实现突破性增长的可能性也比较低。

7.1.3 光电

过去的十年里，中国光伏产业经过技术创新，已经完成了从“三头在外”（原材料、市场、核心技术受制于人）到成为全球领导者的巨大飞跃。中国建立了完整的光伏产业链，包括从硅材料和晶体生长到太阳能电池组件的生产，再到光伏电站的建设和运营，并为全球市场提供了超过 70% 的光伏组件，产值突破 7500 亿元。随着清洁能源占比的提高，光电发电规模也将持续扩大。[16] 根据十四五发展规划的要求，2030 年风电和太阳能发电总装机容量达到 12 亿千瓦以上。[9]

然而，技术创新发展所需时间长，光电产业难以保证在短期取得突破性成果。

7.1.4 风电

我国风电产业规模稳步扩大，受益于风电优越的性能和成本优势，在洁净能源开发领域占据重要地位。我国风电产业技术水平不断突破，已成为世界级风电打国，风电利用率大幅提高，21 年中国风电平均利用率为 96.9%，较 2012 年提高近 14 个百分点。[10] 然而由于风电场受制于严苛的环境条件，对稳定性和传输成本有重大挑战。为保障能源安全，其难以作为我国支撑性能源。

7.1.5 生物质能

“十四五”可再生能源发展规划中指出，国家规划稳步推进生物质能多元化开发。我国生物质发电技术发展成熟，资源丰富。双碳背景下，生物质能发展迎来新契机。中国拥有丰富的生物质资源，特别是有机废弃物，如农作物秸秆、畜禽粪便、林产业加工废料、生活垃圾等，年可利用量相当于 9 亿吨标准煤。[17] 同时我国还拥有 4600 多万公顷宜林地，可用于生态建设和种植能源作物，为生物质能发电产业的发展提供了有利条件。

碳达峰和碳中和目标代表着中国经济向高质量发展的迈进。生物质能发电技术作为当前最常见、最有效的生物质能利用方式之一，具有巨大潜力。结合 BECCS 技术，生物质有望实现负碳排放，为实现 2030 年碳达峰和 2060 年碳中和目标提供有力支持。

7.2 洁净能源替代方案的选择和发电量预测

基于以上对于各洁净能源的细致分析，本文计划大力推行生物质能发电，在全国大规模建设 CBECCS 装置，以替代最近建造的超临界和超超临界燃煤发电厂。从 2023 年开始，在华北、华东地区逐步建设，直到 2030 年在全国多个地区总共部署 30GW 的净零温室气体排放的 CBECCS 装置，每个装置容量为 410MW，共计 74 个装置。这些装置将利用中国大陆可利用的约 4.86% 的农作物残留物作为燃料，以取代燃煤发电厂产生的电力。到 2060 年，部署 200GW 的 CBECCS 装置，预计每年发电 1261.2TWh，未来 50 年 CBECCS 发电量预测如图6。

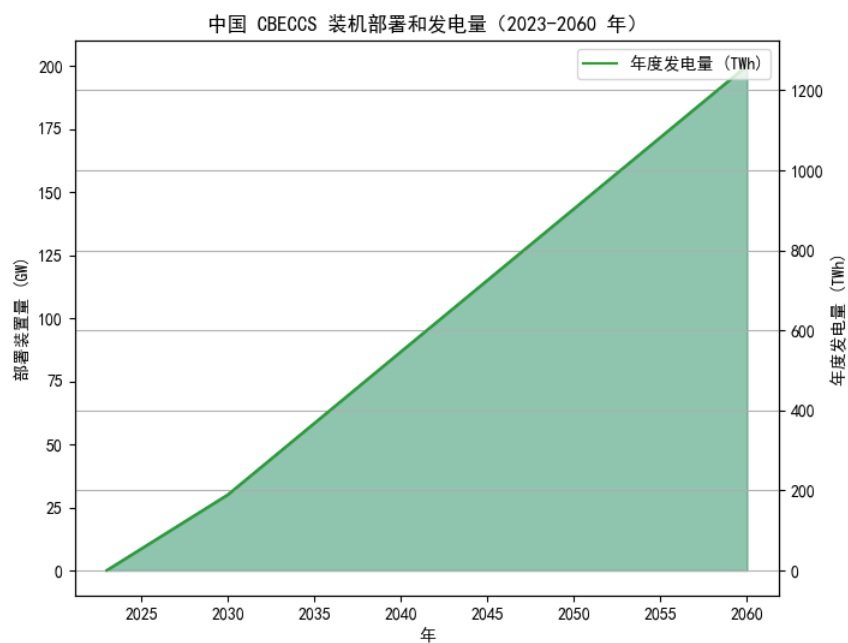


图 6 洁净能源替代方案发电量

7.3 碳排放预测

考虑到随着碳价的提高，我们可以通过逐渐提高生物质比例，同时突破二氧化碳的负排放，如图8。

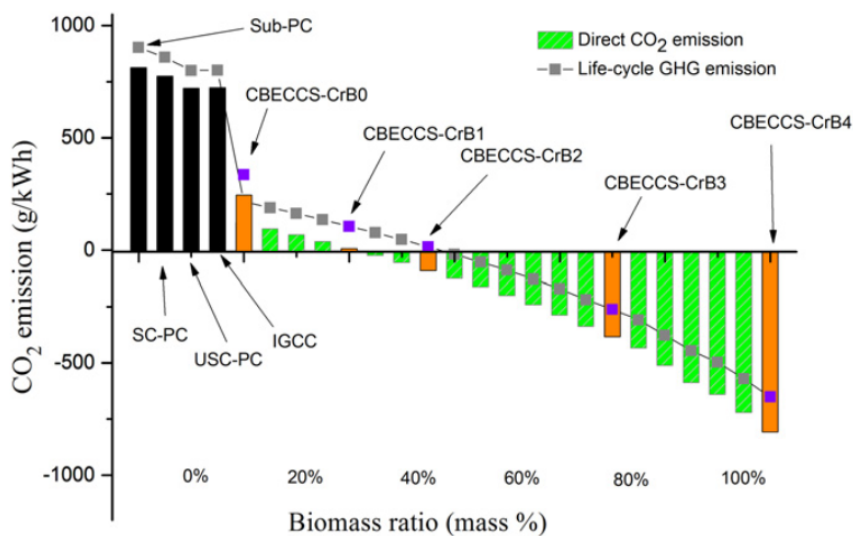


图 7 生物质能发电排放 [18]

因此，本文将基于问题一预测结果结合生物质能替代的煤炭碳排放量以及生物质能实现碳排放负增长的部分数据，完成该洁净能源替代方案 2030 和 2060 的碳排放量预测。方案预计在 2060 年实现 25% 的发电装置使用 $CBECCS - CrB3$ 生物质发电，每年额外吸收 15765 万吨二氧化碳。故 2060 年碳排放量预测公式如下：

$$I = I_1 - I_2 \quad (15)$$

其中 I_1 为生物质能替代后的能源碳排放量预测值， I_2 为生物质能碳排放吸收值；根据以上计算，我们得到洁净能源替代后的碳排放预测值：

表 12 洁净能源替代后的碳排放预测值

年份	碳排放量 (*10 ⁶)	单位
2030	14648.44854	mt
2060	14099.8848	mt

八、问题四的模型的建立和求解

除去煤炭的高效开发和洁净利用以及洁净能源的使用，本论文认为提高森林覆盖率也是一种降低二氧化碳的可行路径。在全国森林可持续经营试点实施方案中我国政府提到要加强森林可持续经营，以急需抚育的中幼林为重点，优先考虑人工林、商品林中的中幼龄林抚育，兼顾天然林、公益林的中幼龄林培育。本论文结合国家政策，提出了优化森林管理策略，通过系统动力学模型模拟不同的森林管理策略来评估和优化这些策略的效果，从而制定有效的植树造林和森林保护计划。

我国 2023 年森林面积已达 2.31 亿公顷，森林覆盖率为 24.02%。在过去十年中，我国累计造林 9.6 亩，森林抚育 12.4 亿亩，固碳量可达每年 3.59 亿吨。在此基础上，我们做出了情景假设，并以 50 年为预测时间来模拟和评估本论文方案的效果。

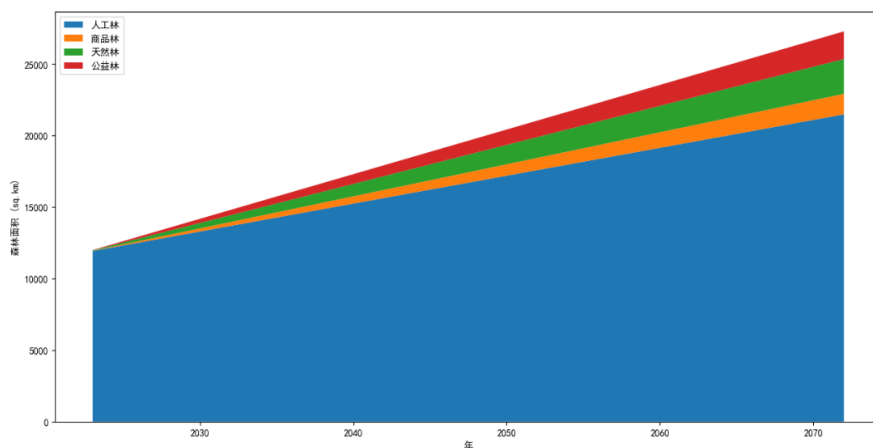


图 8 中国森林面积

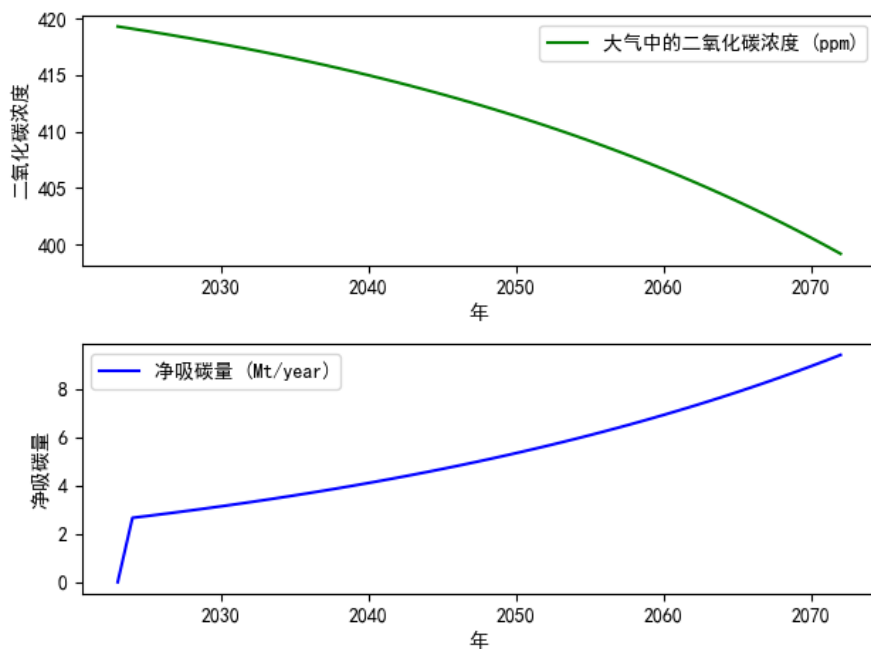


图 9 碳汇方案表现

九、双碳建议报告

致能源管理部门：

在当前全球气候变化的大背景下，实现碳达峰和碳中和已成为我国的重要战略目标。我们团队基于习总书记的重要指示，完成了对于未来 40 年中国碳排放的预测研究。在这份报告中，我荣幸地向您展示我们在双碳政策背景下，对中国碳排放量预测的研究

成果。我们采用了回归分析的方法，选取了国内生产总值（以亿元计）、城市人口占比、碳排放强度、清洁能源占比以及森林覆盖率等五个关键指标，构建了一个岭回归预测模型。这一模型将为我们提供了在基础条件下碳排放量的预测结果。

在此基础上，我们进一步进行了两种情景分析，以期为实现碳达峰和碳中和目标提供可能的路径。

首先，在第一种情景中，我们专注于煤炭的高效开发与洁净化利用技术的创新。我们特别引入了变压吸附捕集技术（*Pressure Swing Adsorption, PSA*），并选用了 MIL-101 (Cr) 作为吸附剂，以期实现碳排放强度的显著降低，同时提升发电效率。在这一情景下，我们预测到 2030 年的碳排放量将降至 $13991 \times 10^6 \text{ mt}$ ，而到 2060 年将降至 $9846 \times 10^6 \text{ mt}$ ，与当前水平相比，分别实现了 17.29% 和 37.24% 的显著降低。

其次，在第二种情景中，我们将研究重点转向了清洁能源的利用。通过对我国能源发展趋势的深入分析，我们选择了大力发展生物质能源作为主要的能源转型策略。同时，我们还考虑了地域差异，并提出了一个渐进式的实施方案。在这一情景下，我们预测到 2030 年的碳排放量将降至 $14648 \times 10^6 \text{ mt}$ ，而到 2060 年将降至 $14100 \times 10^6 \text{ mt}$ 。

在深入分析了我国实现双碳目标的可行技术路径后，我谨提出以下综合性建议，以期作为政策制定和实施提供参考：

- **技术创新与研发：**加强煤炭高效洁净化利用技术的研发力度，特别是变压吸附捕集技术（PAS）的优化和应用，以 MIL-101 (Cr) 等高性能吸附剂为突破口，实现碳排放强度的显著降低。同时，加大对清洁能源技术，尤其是生物质能源技术的研发投入，推动能源结构的优化升级。
- **能源结构转型：**制定明确的能源转型路线图，逐步减少对化石能源的依赖，提高清洁能源在能源结构中的比例。特别是生物质能源，应结合我国丰富的农业和林业资源，发展适合不同地区的生物质能源利用模式。
- **跨部门协作：**建立跨部门协作机制，确保能源、环境、经济等多个领域的政策协同，形成推动双碳目标实现的强大合力，实现区域协调发展。

通过多方共同努力，我们有信心实现“碳达峰”和“碳中和”的目标，为全球气候变化的应对贡献中国力量。

此致

敬礼！

2024/6/9

十、模型的评价

10.1 模型的优点

- 优点 1 模型充分考虑了碳排放的多个因素，包括经济发展水平、人口规模、技术水平、能源结构和碳汇能力，使得预测结果更加全面和准确。
- 优点 2 建立预测模型之前，对数据进行了预处理，包括缺失值的填充和归一化处理，以确保数据的完整性和可比性。
- 优点 3 模型建立在 IPAT 模型和 STIRPAT 模型的基础上，在环境科学领域有着较为广泛的应用和理论基础，为模型的构建提供了可靠的理论支持。
- 优点 4 采用“定量分析与定性分析相结合”，结合双碳政策背景，使得模型更具说服力。

10.2 模型的缺点

- 缺点 1 模型对于影响碳排放的因素仍考虑不足，导致部分局限性。
- 缺点 2 考虑到实际情况的复杂变化，模型中使用的数据可能存在不确定性，影响模型的预测结果和可靠性。

10.3 模型的推广

- 收集更多影响因素数据，建立更完备的数据集进行求解；
- 纳入时空因素的考虑。

参考文献

- [1] 聂锐, 张涛, 王迪. 基于 IPAT 模型的江苏省能源消费与碳排放情景研究[J]. 自然资源学报, 2010, 25(9):1557-1564.
- [2] 渠慎宁, 郭朝先. 基于 STIRPAT 模型的中国碳排放峰值预测研究[J]. 中国人口·资源与环境, 2010, 20(12):10-15.
- [3] 刘思峰, 蔡华, 杨英杰, 等. 灰色关联分析模型研究进展[J]. 系统工程理论与实践, 2013, 33(8):2041-2046.
- [4] 杨楠. 岭回归分析在解决多重共线性问题中的独特作用[J]. 统计与决策, 2004(3): 14-15.
- [5] 傅春, 赵晓霞. 双循环发展战略促进新旧动能转换路径研究——对十九届五中全会构建新发展格局的解读[J]. 理论探讨, 2021(1):82-87.

- [6] “十四五”新型城镇化实施方案[J]. 广西城镇建设, 2022(7):11-41.
- [7] 中国新型城镇化理论·政策·实践论坛 2023[C]/[出版地不详: 出版者不详], 2023.
- [8] 城市蓝皮书——中国城市发展报告 No.8[J]. 智慧中国, 2015(2):8-12.
- [9] 2030 年前碳达峰行动方案[J]. 人民日报, 2021:007.
- [10] 《新时代的中国能源发展》白皮书——我国提前实现碳排放强度下降目标[J]. 资源节约与环保, 2021(1):2-3.
- [11] 崔海鸥, 刘珉. 我国第九次森林资源清查中的资源动态研究[J]. 西部林业科学, 2020, 49(5):90-95.
- [12] 李杰. 天然气低氮燃烧技术的研究现状及趋势[J]. 中国科技成果, 2015, 0(4).
- [13] 李阳, 王锐, 赵清民, 等. 中国碳捕集利用与封存技术应用现状及展望[J]. 石油科学通报, 2023, 8(4):391-397.
- [14] 叶奇蓁. 中国核电发展战略研究[J]. 电网与清洁能源, 2010, 26(1):3-8.
- [15] 张所续, 马伯永. 世界能源发展趋势与中国能源未来发展方向[J]. 中国国土资源经济, 2019, 32(10):20-27+33.
- [16] 付融冰, 张慧明. 中国能源的现状[J]. 能源环境保护, 2005(1):8-12.
- [17] 蒋剑春. 生物质能源应用研究现状与发展前景[J]. 林产化学与工业, 2002(2):75-80.
- [18] Gasification of coal and biomass as a net carbon-negative power source for environment-friendly electricity generation in China | PNAS[EB/OL]. [2024-06-09]. <https://www.pnas.org/doi/abs/10.1073/pnas.1812239116>.
- [19] 能源发展战略行动计划 (2014-2020 年)(摘录)[J]. 上海节能, 2014(12):1-2.
- [20] 江泽民. 对中国能源问题的思考[J]. 上海交通大学学报, 2008(3):345-359.

附录 A 文件列表

文件名	功能描述
GDP.xlsx	国民生产总值
International Energy Agency - electricity generation sources in China.xlsx	电力数据表格
sum.xlsx	汇总表格
不同产业的 GDP 占比.xlsx	不同产业 GDP 占比数据
不同能源的消耗.xlsx	不同能源消耗数据
人口年度数据.xlsx	年度人口数据
森林数据.xlsx	森林相关数据
太阳能发电量.xlsx	太阳能发电量数据
新能源.csv	新能源发电量数据
中国表观碳排放清单 1997-2021.xlsx	中国 1997-2021 年表观碳排放清单
中国分部门核算碳排放清单 1997-2021.xlsx	中国 1997-2021 年分部门核算碳排放清单
中国能源清单 1997-2021.xlsx	中国 1997-2021 年能源清单
BECCS.py	模拟生物能源碳捕集与储存技术
carbon_forecast.py	预测或模拟碳排放趋势
forest.py	森林生态系统的模拟或分析
GDP_sim.py	模拟国内生产总值增长
grey.py	灰色系统理论模型应用
renewable_ana.py	新能源分析脚本
Ridge_pred.py	岭回归预测模型
Ridge_regression.py	岭回归分析脚本
Ridge_with_cons.py	带约束条件的岭回归模型