



全球主要经济体非二氧化碳温室气体排放特征研究

Research on Characteristics of Non-CO2 Greenhouse Gases Emission in Major Global Economies

期刊：	能源与气候变化
稿件ID：	JECC-2025-0021.R4
稿件栏目：	能源与气候经济
作者提交日期：	2025-06-26
关键词：	非二氧化碳温室气体, 排放数据集, 排放特征, 温室气体减排
英文关键词：	non-CO2 greenhouse gases, GHG emission dataset, Emission evolution characteristics, Greenhouse gas emission reduction
学科领域：	
专题：	

# 全球主要经济体非二氧化碳温室气体排放特征研究

饶婧怡<sup>1</sup>, 郭金玲<sup>2</sup>, 刘娜<sup>1</sup>

1. 厦门大学 管理学院, 厦门, 361005;

2. 中国矿业大学(北京) 管理学院, 北京, 100083

**摘要:** 本文系统比较了全球碳项目(GCP)、联合国气候变化框架公约(UNFCCC)和欧洲排放数据库(EDGAR)三大数据集, 以综合优势明显的EDGAR作为主要数据源分析全球非二氧化碳温室气体(简称“非二”)排放特征。研究表明, 全球“非二”排放总量持续增长, 中国、美国、印度等10个主要经济体排放占比达58.3%, 中国排放量与增速均居首位。“非二”气体中甲烷的排放量最大, 含氟气体排放增速最快。不同经济体的部门排放结构各异, 但总体呈现农业主导、能源主导、农业主导转为能源主导三类典型模式。美国在部分年份实现了“非二”气体排放与经济增长的强脱钩, 中国、印度长期处于弱脱钩状态。当前排放清单在数据一致性、完整性和准确性方面仍存在不足, 数据质量的不确定性仍是制约减排研究的关键瓶颈, 亟需建立覆盖全面、方法统一的高质量排放数据集, 为精准识别全球主要经济体“非二”排放特征、制定差异化管控策略提供科学支撑。

**关键词:** 非二氧化碳温室气体; 排放数据集; 排放特征; 温室气体减排

**中图分类号** P467; X51

## Research on Characteristics of Non-CO<sub>2</sub> Greenhouse Gases Emission in Major Global Economies

RAO Jingyi<sup>1</sup>, GUO Jingling<sup>2</sup>, LIU Na<sup>1</sup>

1. School of Management, Xiamen University, Xiamen 361005, China;

2. School of Management, China University of Mining and Technology-Beijing,  
Beijing 100083, China

第一作者: 饶婧怡(2002—), 女, 硕士研究生, 研究方向为能源经济与能源政策。Email: wx24680525@163.com.

通讯作者: 刘娜(1999—), 女, 博士研究生, 研究方向为能源经济与能源政策。Email: liuna\_sx@163.com.

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(72374175)

**Abstract:** This paper systematically compares three major data sets of Global Carbon Project (GCP), the United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC) and the European Emission Database (EDGAR), and uses EDGAR with obvious comprehensive advantages as the main data source to analyze the global non-CO<sub>2</sub> greenhouse gas emission characteristics. Research shows that the global total non-CO<sub>2</sub> emissions continue to grow, with emissions from 10 major economies including China, the United States, and India accounting for 58.3%, and China's emissions and growth rate rank first. CH<sub>4</sub> emissions among non-CO<sub>2</sub> greenhouse gases are the largest, and fluorine-containing gases are the fastest growing emissions. The sectoral emission structures of different countries vary, but overall, there are three typical models: agricultural dominance, energy dominance, and agricultural dominance to energy dominance. The United States has achieved a strong decoupling between non binary gas emissions and economic growth in some years, while China and India have been in a weak decoupling state for a long time. The current emission inventory still has shortcomings in data consistency, completeness, and accuracy, and the uncertainty of data quality remains a key bottleneck restricting emission reduction research. It is urgent to establish a high-quality emission dataset with comprehensive coverage and unified methods to provide scientific support for accurately identifying the non-CO<sub>2</sub> emission characteristics of major economies around the world, formulating differentiated control strategies, and ultimately achieving coordinated control of non-CO<sub>2</sub> emissions and economic growth .

**Keywords:** Non-CO<sub>2</sub> greenhouse gases; GHG emission dataset; Emission evolution characteristics; Greenhouse gas emission reduction

## 1 引言

在第 29 届联合国气候变化大会 (Conference of the Parties, COP29) 上, 国际社会对非二氧化碳温室气体 (简称“非二”) 排放的关注显著提升。2022 年, 由甲烷 (CH<sub>4</sub>)、氧化亚氮 (N<sub>2</sub>O) 及含氟气体构成的“非二”排放量约占全球温室气体排放总量的 25%<sup>[1]</sup>。这类气体具有超强的全球增温潜势 (Global Warming

Potential, GWP) 且排放增速快。自工业革命以来,“非二”对全球历史温升贡献已达 0.7°C。其中,甲烷贡献 0.5°C,与二氧化碳的 0.8°C 温升贡献量级相当<sup>[2]</sup>。若延续当前排放轨迹,未来数十年内全球“非二”排放仍将持续显著增长,因此,强化“非二”减排已成为短期内实现全球气候目标的关键路径。

“非二”排放研究在不同尺度和不同领域的排放核算<sup>[3-5]</sup>、排放预测与减排潜力评估<sup>[6-8]</sup>、控排政策设计<sup>[9-14]</sup>等维度取得了显著进展,但由于排放源的高度分散性和监测技术的局限性,“非二”排放的精确测量仍存在较大难度。农业部门水稻种植中甲烷和氧化亚氮的排放强度受作物类型、土壤条件和耕作方式等多重因素影响,使得精确计量变得异常复杂<sup>[15-16]</sup>。此外,全球范围内“非二”排放清单编制存在显著不确定性,主要源于不同研究机构和国际组织采用的核算方法存在较大差异。2010 年基于国家清单的全球甲烷排放量较大气反演结果整体偏低 16%-29%,这一偏差已得到多项研究验证<sup>[17]</sup>。Deng 等<sup>[18]</sup>通过 GOSAT 卫星观测数据进一步证实,大气甲烷浓度对应的实际排放通量高于官方清单数据,凸显了当前清单体系在准确反映“非二”排放方面的局限。

然而,现有研究对全球主要经济体“非二”排放数据集的系统性比较分析仍显不足。鉴于此,本研究选取欧盟全球排放数据库(United Nations Framework Convention on Climate Change, EDGAR)、联合国气候变化框架公约(Emission Database for Global Atmospheric Research, UNFCCC)以及全球碳项目(Global Carbon Project, GCP)三个国际权威数据库中的“非二”温室气体排放数据集,系统比较其在研究范围、气体类别以及核算方法等方面的关键差异,揭示全球 10 个主要经济体“非二”温室气体排放的趋势规律并深入分析其原因,最后提出层次清晰、操作性强的政策建议,构建“非二”温室气体研究从数据评估、特征分析到改进对策的研究链条,为完善多层次排放清单体系以及优化全球、区域排放清单提供兼具科学严谨性与可操作性的解决方案。

## 2 研究方法 with 数据来源

### 2.1 主流数据库介绍

全球温室气体排放数据库对于准确掌握排放数据、开展温室气体减排相关研究至关重要,其中,EDGAR、UNFCCC 以及 GCP 是三个被广泛运用的权威数

1  
2  
3  
4  
5  
6  
7  
8  
9  
10  
11  
12  
13  
14  
15  
16  
17  
18  
19  
20  
21  
22  
23  
24  
25  
26  
27  
28  
29  
30  
31  
32  
33  
34  
35  
36  
37  
38  
39  
40  
41  
42  
43  
44  
45  
46  
47  
48  
49  
50  
51  
52  
53  
54  
55  
56  
57  
58  
59  
60

数据库。

EDGAR 数据库由欧盟委员会联合研究中心开发，最新版本 EDGAR 提供了 1970 至 2023 年全球范围的空间分辨率为  $0.1^{\circ} \times 0.1^{\circ}$  的“非二”温室气体排放数据，构建了完整的全球排放时间序列，保障了排放数据的长期可比性<sup>[19]</sup>。EDGAR 采用创新的混合方法学框架，整合了国际能源署（International Energy Agency, IEA）能源数据、联合国粮农组织（Food and Agriculture Organization Statistics, FAOSTAT）农业统计等多源活动数据，结合国家-技术层级的动态排放因子库，并对能源部门和油气系统逃逸排放进行精细化处理，使其成为目前最全面的全球排放数据库之一<sup>[20]</sup>。

UNFCCC 数据库作为《巴黎协定》全球透明度框架的核心组成部分，其数据源自缔约方国家信息通报，是全球最具政策权威性的排放数据来源<sup>[21]</sup>。该数据库采用通用报告格式（Common Reporting Format, CRF）表格体系，涵盖 1990 年至 2021 年期间 44 个附件 I 国家和 148 个非附件 I 国家的“非二”排放数据，包含甲烷、氧化亚氮等强制报告气体及三氟化氮等可选报告气体，严格遵循政府间气候变化专门委员会（Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC）2006 指南分类体系，将排放源细分为能源、工业过程、农业等五大类。数据通过附件 I 国家的年度报告和非附件 I 国家的双年更新报告机制持续更新。

GCP 数据库是国际科学理事会支持的重要碳循环研究平台，突出特点是整合多源观测与模型数据，提供准实时的全球碳收支评估。GCP 的“非二”数据集核心产品包括全球甲烷预算和氧化亚氮专项<sup>[22]</sup>。该数据库采用“自下而上”与“自上而下”相结合的多源数据融合方法，整合卫星观测、地面监测网络和行业活动数据，并运用同位素示踪和机器学习技术提升源解析精度<sup>[23]</sup>。GCP 数据库通过多位专家的年度同行评议确保可靠性，其开放获取政策极大促进了科研共同体对碳循环动态的理解<sup>[24]</sup>。

## 2.2 数据集比较

EDGAR、UNFCCC 和 GCP 三大全球温室气体排放数据库在覆盖范围、时间跨度、气体种类、排放源分类、核算方法及数据完整性等方面存在差异，也各具特色与优势，本节对上述三个数据库的核心特征进行详细比较分析，如表 1 所示。

1  
2  
3  
4  
5  
6  
7  
8  
9  
10  
11  
12  
13  
14  
15  
16  
17  
18  
19  
20  
21  
22  
23  
24  
25  
26  
27  
28  
29  
30  
31  
32  
33  
34  
35  
36  
37  
38  
39  
40  
41  
42  
43  
44  
45  
46  
47  
48  
49  
50  
51  
52  
53  
54  
55  
56  
57  
58  
59  
60

在数据覆盖范围与时间尺度方面,EDGAR 覆盖全球 223 个经济体,提供 1970 年至 2023 年连续时间序列的“非二”排放数据,是三个数据库中时间跨度最长、连续性最好的数据库,并能够提供高空间分辨率的连续数据。UNFCCC 数据库则基于《联合国气候变化框架公约》缔约方的义务,包含 1990-2021 年 44 个附件 I 国家和 148 个非附件 I 国家的数据,而非附件 I 国家仅提供个别年份的数据,数据完整性相对较低。GCP 数据库聚焦于全球 20 个主要区域从 2000 年至 2021 年的数据,其时间跨度相对较短,侧重于整合性分析。

在气体种类和排放源分类方面,EDGAR 数据库涵盖甲烷(CH<sub>4</sub>)、氧化亚氮(N<sub>2</sub>O)以及氢氟碳化物(HFCs)、全氟化碳(PFCs)、六氟化硫(SF<sub>6</sub>)等 25 种含氟气体,并细分了能源、工业、农业等五大排放源类别。UNFCCC 数据库包含 6 种主要含氟气体,其排放源分类与 EDGAR 类似,但其数据来源依赖成员国提交的官方清单,数据质量受国家能力差异影响显著。GCP 数据库统计了甲烷和氧化亚氮的排放数据,未包含含氟气体,且排放源分为化石燃料和土地利用变化,分类方式较为粗略。

在核算方法及数据完整性方面,EDGAR 采用 IPCC 指南的排放因子法,活动数据来源于国际能源署(IEA)、联合国粮食及农业组织(FAOSTAT)等国际统计数据,采用跨部门一致的因子,避免国家间因方法差异导致的偏差,确保了全球数据的一致性。该数据库提供了高空间分辨率的全球网格数据,其核算结果的不确定性主要源于活动数据的精度。UNFCCC 数据库依赖于各国自主提交的排放清单,各国需严格遵循 IPCC《国家温室气体清单指南》层级方法(Tier 1-3),可自定义方法但需透明报告,优先采用本国特定因子,否则使用 IPCC 缺省值。附件 I 国家(主要为发达国家)的数据较为完整可靠,而非附件 I 国家(主要为发展中国家)多依赖 IPCC 默认值和较低层级方法,导致数据质量与附件 I 国家存在显著差距,且可能存在系统性低估。此外,非附件 I 国家普遍存在数据缺失和严重滞后问题,通常仅能提供个别年份的数据。GCP 整合了基于活动数据和排放因子的“自下而上”和基于大气观测和反演模型的“自上而下”两种核算方法,数据来源包括 EDGAR、美国环境保护署 EPA、卫星观测及地面监测网络等。GCP 采用动态因子并公开不确定性范围,如煤炭排放因子随能源结构变化进行动态调整。此外,模型误差以及多源数据整合过程可能引入额外的不确定性。在

数据完整性方面，其时间序列相对较短，且仅将全球划分为主要的二十个区域进行数据统计，并未涉及覆盖各国“非二”的详细排放数据，缺乏国家层面的详细数据支撑。

在涵盖的部门方面，EDGAR 数据库涵盖了能源、工业、农业、土地利用与林业、废弃物等全经济部门，相对于 UNFCCC 与 GCP 数据库更全面与细致。UNFCCC 数据库的部门覆盖依赖于各国报告，GCP 数据库的分类则较为宏观。

表 1 “非二”气体排放数据集比较

Table 1 Comparison of non- CO<sub>2</sub> greenhouse gas datasets

维度	EDGAR	UNFCCC	GCP
数据范围	全球 223 个经济体	全球 44 个附件 I 国家+148 个非附件 I 国家	全球 20 个主要区域
数据年份	1970-2023 年	1990-2021 年（附件 I）+部分单年份（非附件 I）	2000-2021 年
气体种类	甲烷、氧化亚氮、25 种含氟气体	甲烷、氧化亚氮、6 种含氟气体	甲烷、氧化亚氮
排放源类别	能源、工业过程、农业、废弃物、其他（含土地利用变化和林业）	能源、工业过程与产品使用、农业、废弃物、土地利用变化和林业	化石燃料、土地利用变化、其他人为源
核算方法	结合国际统计数据 and 排放因子法（IPCC 指南）	排放因子核算、Tier 1/2/3 模型、实测法	排放因子法、卫星观测、反演模型估算
数据来源	IEA 能源数据、FAOSTAT 农业统计、工业报告、IPCC 排放因子	成员国官方提交的清单、部分使用 IPCC 默认值	整合 EDGAR、EPA、文献研究及大气观测
不确定性来源	不同排放源、活动数据	国家间核算方法差异、非附件 I 国家数据不完整	数据来源的多样性、模型的不确定性

在数据的不确定性方面，表 2 以甲烷排放为例对 EDGAR 和 GCP 全球“非二”数据集进行对比分析，结果显示在 2000-2021 年期间，GCP 核算的全球年度甲烷排放量持续高于 EDGAR 的核算结果。这一系统性差异揭示了当前全球温室

气体排放核算面临的核心挑战：不同数据库因采用的方法学框架、活动数据源、排放因子选择及空间-时间分配方案的不同，导致对同一排放实体的估算结果存在显著偏差。这种差异凸显了提升排放核算一致性、透明度和验证能力的重要性。数据集层面的不足对深入理解“非二”排放动态、评估减排措施效果构成了障碍，并可能制约《全球甲烷承诺》等国际倡议的有效落实。

表 2 EDGAR 和 GCP 全球甲烷排放量 (Tg/年)

Table 2 Global CH<sub>4</sub> Emissions from EDGAR and GCP (Tg/year)

年份	GCP	EDGAR	年份	GCP	EDGAR
2000	303.79	274.90	2011	345.95	313.85
2001	304.87	274.35	2012	351.77	316.66
2002	312.41	273.07	2013	351.26	317.53
2003	317.57	280.76	2014	358.29	319.94
2004	325.30	286.27	2015	364.93	320.90
2005	330.69	291.29	2016	355.82	322.86
2006	339.48	296.35	2017	359.08	327.27
2007	335.96	298.63	2018	363.32	332.33
2008	337.86	302.96	2019	369.03	335.03
2009	339.64	301.99	2020	368.22	332.07
2010	343.29	306.87	2021	377.74	338.40

### 2.3 脱钩分析方法

Tapio 脱钩指数模型是用于量化经济增长与环境压力之间“脱钩”关系的分析工具<sup>[27]</sup>，当“非二”排放量增速为负或其增速小于经济增速时的状态为脱钩，表明经济增长与温室气体排放之间的联系逐渐减弱，最终实现经济增长的同时逐渐降低温室气体排放量，本文运用 Tapio 脱钩指数模型分析主要经济体的“非二”排放量与各国 GDP 之间脱钩关系的历史变化，计算公式如下：

$$\varepsilon = \frac{\Delta E/E}{\Delta GDP/GDP} \quad (1)$$

其中， $\varepsilon$ 代表脱钩弹性指数，反映环境压力对经济增长的敏感度，E为“非二”排放量，单位为 Mt CO<sub>2</sub>eq， $\Delta E/E$ 为“非二”排放量的增长率， $\Delta GDP/GDP$

为各国 GDP 的增长率。

### 3 全球主要经济体“非二”排放演变特征与脱钩规律分析

基于上述数据集的比较分析，EDGAR 数据库在时间序列完整性、全球覆盖一致性、气体种类与排放源分类全面性以及高空间分辨率方面具有显著优势，本研究选用 EDGAR 2024 数据库作为核心数据源，对 10 个主要经济体的甲烷、氧化亚氮以及 EDGAR 所涵盖的 25 种含氟气体排放情况进行比较分析。根据 100 年水平的全球增温潜势值（GWP）计算，甲烷转化系数为 28，氧化亚氮转换系数为 265<sup>[25]</sup>。

#### 3.1 全球主要经济体“非二”演变历程

2023 年，全球 223 个主要经济体的“非二”排放总量为 13939.1 Mt CO<sub>2</sub>eq，研究所选取的 10 个主要经济体“非二”排放总量为 8122Mt CO<sub>2</sub>eq，占其中的 58.3%，与 1970 年排放总量 4191.2Mt CO<sub>2</sub>eq 相比上升了 93.8%。图 1 呈现了 1970-2023 年主要经济体“非二”排放量的变化情况。

“非二”排放总量方面，2023 年排放量最大的两个经济体分别是中国（2684.3Mt CO<sub>2</sub>eq）和美国（1278.8Mt CO<sub>2</sub>eq），占主要经济体总量的 48.8%，其次为印度和巴西，伊朗的“非二”排放量（218.0Mt CO<sub>2</sub>eq）最小。排放趋势方面，主要经济体的“非二”排放量变化均有所增加，但增加幅度存在显著差异。中国 1970-2023 年“非二”排放量增加 1559.2Mt CO<sub>2</sub>eq，年均增长率 1.7%，尤其是 2001-2006 年间的排放最为明显，呈现出急剧增长的态势。美国 1970-2023 年增加了 85.2 Mt CO<sub>2</sub>eq（+7.1%）的“非二”排放，整体增长趋势平缓。巴基斯坦 1970-2023 年“非二”排放增量为 249.6Mt CO<sub>2</sub>eq，增长率为 303.2%，增长率在 10 国中居于首位。印度和巴西依次增长了 599.5Mt CO<sub>2</sub>eq 和 578.2Mt CO<sub>2</sub>eq，其他五个经济体的排放量差距较小，平均增加 171.8Mt CO<sub>2</sub>eq。

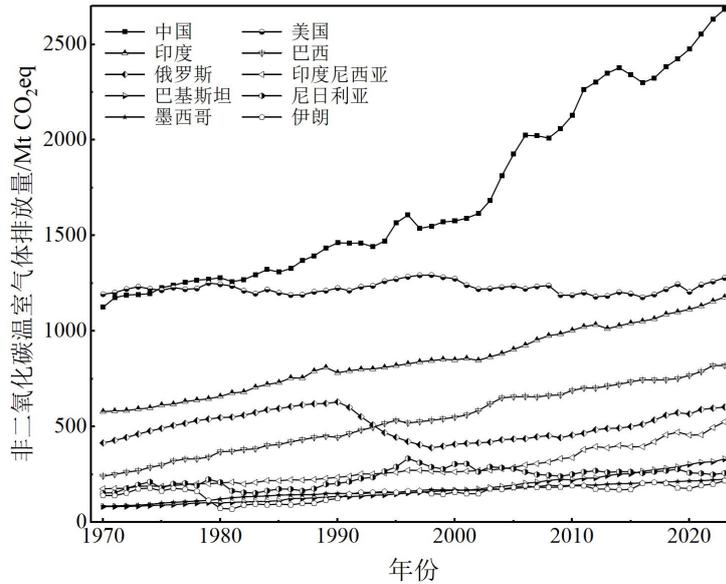


图 1 主要经济体“非二”温室气体总排放量

Figure 1 Total non-CO<sub>2</sub> greenhouse gases emissions in major economies

不同“非二”气体类型方面，主要经济体“非二”排放量占比最高的是甲烷，氧化亚氮次之，含氟气体最少。图 2 展示了主要经济体三类“非二”的排放情况，其中，中国是三类“非二”排放量均最高的经济体，2023 年甲烷排放量为 1739 Mt CO<sub>2</sub>eq，占比从 87.7%减少为 64.8%；氧化亚氮排放量为 414.5Mt CO<sub>2</sub>eq 增长速度平缓，占比由 11.5%到 15.4%；含氟气体排放量为 530.6 Mt CO<sub>2</sub>eq，占比从 0.8%增长到 19.8%，增幅在 10 个经济体中居于首位，占比从 0.8%增长到 19.8%。美国甲烷排放总量减少但仍位居第二。此外，各经济体排放量均发生增长，其中巴基斯坦的甲烷排放量增长最为迅速，增幅达 265.1%。美国和俄罗斯是仅有的两个氧化亚氮排放出现下降的经济体，其他经济体均呈现增长趋势，其中巴基斯坦的增速 455.4%位列主要经济体之首。各经济体含氟气体均出现指数增长趋势，其中中国、墨西哥、印度、印度尼西亚、巴西增长率超过 10 倍。

1  
2  
3  
4  
5  
6  
7  
8  
9  
10  
11  
12  
13  
14  
15  
16  
17  
18  
19  
20  
21  
22  
23  
24  
25  
26  
27  
28  
29  
30  
31  
32  
33  
34  
35  
36  
37  
38  
39  
40  
41  
42  
43  
44  
45  
46  
47  
48  
49  
50  
51  
52  
53  
54  
55  
56  
57  
58  
59  
60

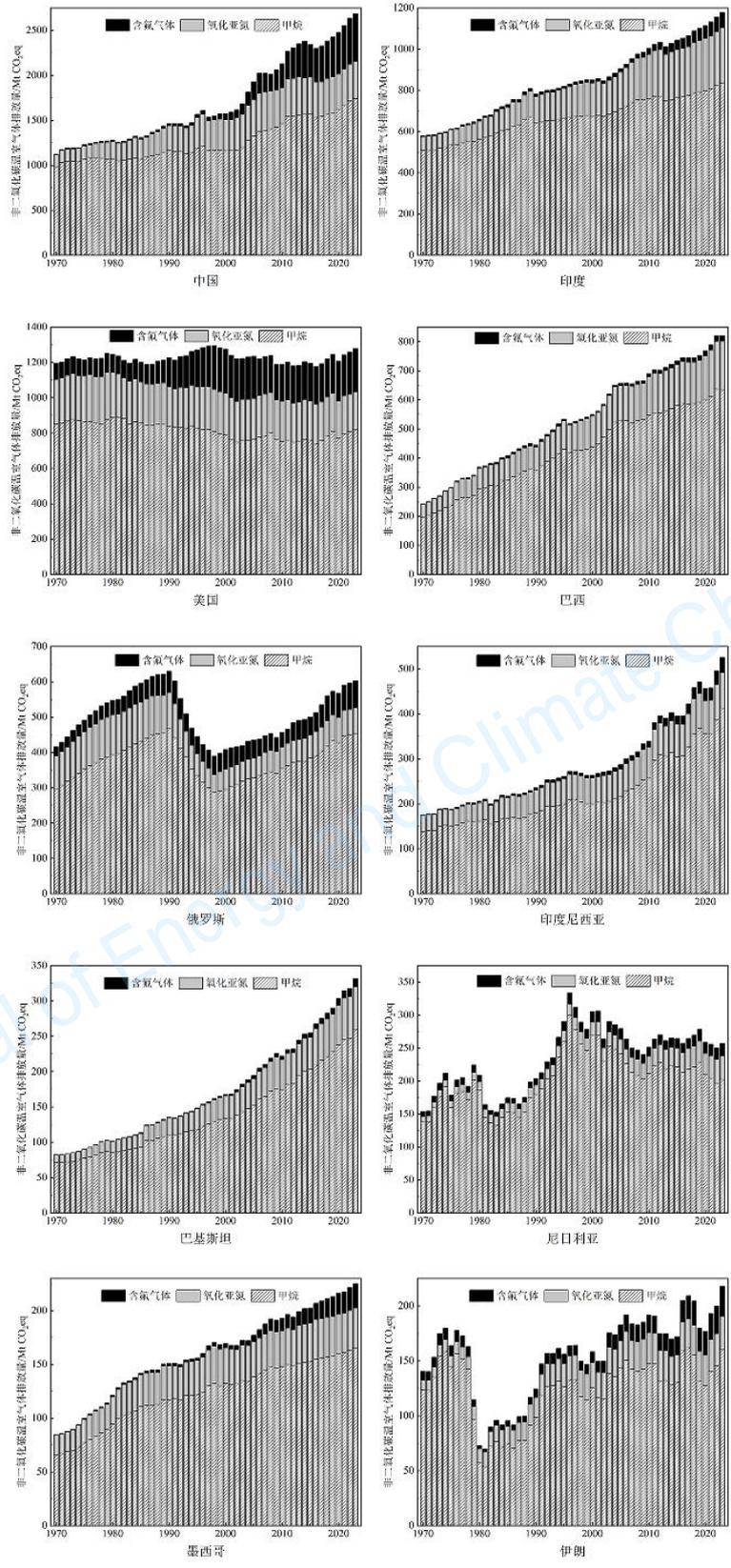


图 2 主要经济体三类“非二”气体排放情况

Figure 2: Emission of three types of non-CO<sub>2</sub> greenhouse gases in major economies

图 3 对比分析了 1970-2023 年主要经济体“非二”人均排放量。1970 年以来，主要核算经济体的人均“非二”排放量呈现分化趋势，中国、巴西、俄罗斯人均排放分别上升 38.4%、50.7%、31.6%，尼日利亚、伊朗人均排放大幅下降 58.4% 和 50.5%，其他经济体基本持平。这一现象表明，人口增长与经济活动扩张对排放的驱动作用可能超过人均排放效率的改善。因此，在控制“非二”排放总量的过程中，需同步关注人均排放的公平性与技术减排潜力。

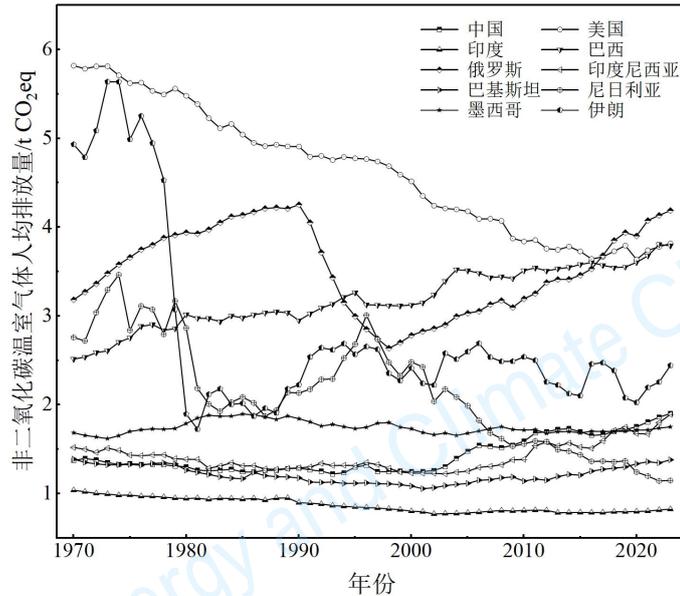


图 3 主要经济体“非二”气体人均排放量

Figure 3 Per capita emissions of non-CO<sub>2</sub> greenhouse gases in major economies

单位国内生产总值 (GDP) 的温室气体排放是衡量一国温室气体排放水平的重要指标。考虑 GDP (2015 年不变价) 因素后<sup>[26]</sup>，图 4 展示了 1970-2023 年主要经济体单位 GDP 的“非二”排放量均呈递减趋势，其中中国和印度减排效果最为显著。值得注意的是，主要核算经济体单位 GDP 的“非二”排放量下降而“非二”总量上升。这表明经济增长带来的排放增量超过了技术减排效果。因此，加强甲烷、氧化亚氮、含氟气体等“非二”的深度减排，仍是实现单位 GDP 温室气体持续下降的关键路径。

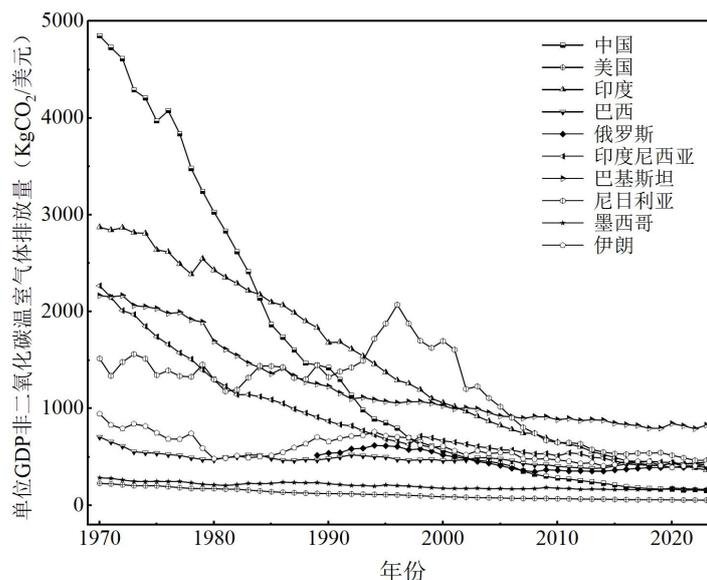


图 4 主要经济体单位 GDP “非二” 气体排放量

Figure 4 Non-CO<sub>2</sub> greenhouse gas emissions per unit GDP of major economies

### 3.2 主要经济体“非二”分排放源演变特征

“非二”的人为源排放主要包括天然气和石油系统泄露、农业活动、垃圾填埋、煤炭开采、污水处理、固定和移动焚烧、毁林垦田活动以及工业生产过程，基本可以归为能源活动、农业活动、工业过程、土地利用与林业和废弃物等五大类。按主要排放源对“非二”进行分类汇总，图 5 展示了主要经济体 1970-2023 年“非二”的构成情况。

1970-2023 年主要经济体“非二”排放的构成情况呈现明显差异。农业排在印度、巴西、巴基斯坦、墨西哥等经济体长期占据主导地位。其中巴基斯坦的农业排放占比最高，从 1970 年的 83.5% 到 2023 年的 78.9%，始终保持着 10 个经济体中最高的农业排放比重。印度的农业排放占比虽然从 79.4% 降至 64.5%，但仍是其最大的排放源。中国、俄罗斯和印度尼西亚等经济体从农业排放主导型逐渐转化为能源排放主导型。中国 1970 年能源排放占比 18.3%、农业排放占比 72%，转变为 2023 年能源排放占比增加至 33.5%、农业排放占比降低至 33.4%，呈现出能源-农业双主导的新格局。俄罗斯的能源排放占比从 30.4% 增至 46.8%，而农业排放占比从 43.8% 降至 17.1%。印度尼西亚能源排放从 20.1% 增至 51.8%，农业从 75.1% 降至 34.1%。美国、尼日利亚、伊朗等经济体则以能源排放为主。美国的能源排放占比相对稳定，长期在 34.0%-38.6% 范围内浮动。伊朗的能源排

放占比从 79.2%降至 62.9%，尼日利亚的能源排放占比从 82.4%降至 48.1%，但仍处于主导地位。工业过程排放在中国、俄罗斯和美国等工业化快速推进的经济体增长明显，占比从最初的 1%-5%上升至 10%-20%。俄罗斯、墨西哥、巴西的土地利用与林业排放占比相对较高并呈现出逐年攀升的趋势，占比高达 22.6%和 28.6%，主要源于森林砍伐和土地利用变化。废弃物处理的“非二”排放的占比较为稳定，在主要经济体中极低通常在 1%-3%之间。

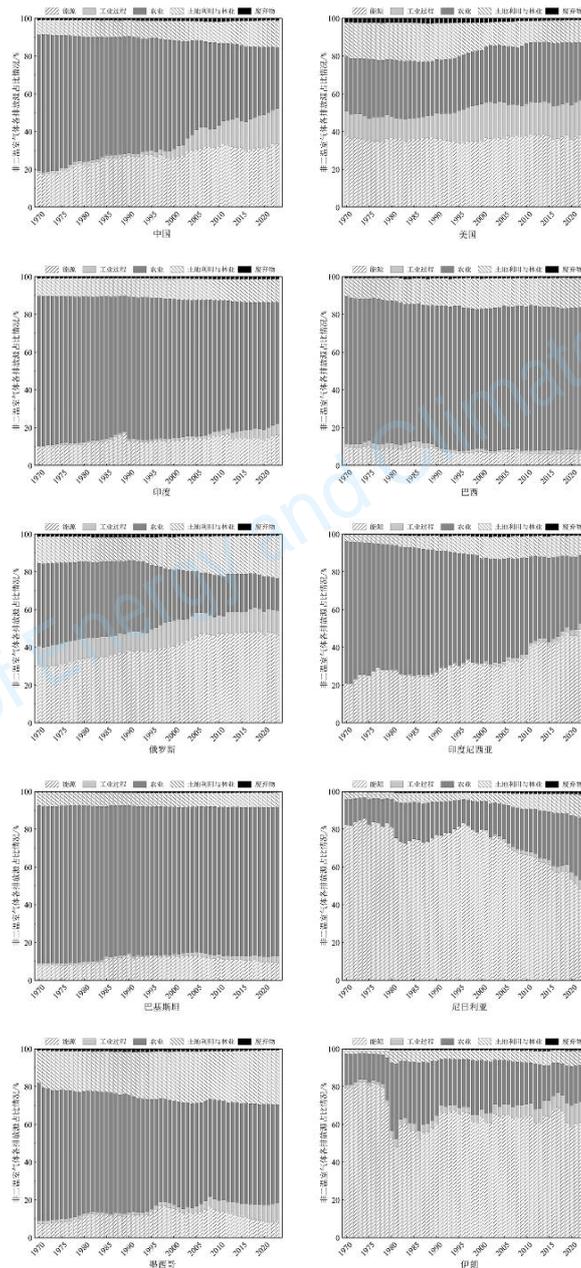


图 5 主要经济体“非二”气体各排放源占比变化情况

Figure 5 Change in the proportion of various emission sources of non-CO<sub>2</sub> greenhouse gases in major economies

1  
2  
3  
4  
5  
6  
7  
8  
9  
10  
11  
12  
13  
14  
15  
16  
17  
18  
19  
20  
21  
22  
23  
24  
25  
26  
27  
28  
29  
30  
31  
32  
33  
34  
35  
36  
37  
38  
39  
40  
41  
42  
43  
44  
45  
46  
47  
48  
49  
50  
51  
52  
53  
54  
55  
56  
57  
58  
59  
60

### 3.3 主要经济体“非二”排放的脱钩规律分析

本文以五年为周期（2020-2023 年仅四年数据）根据公式（1）测算了 1970 年至 2023 年主要经济体的“非二”排放与经济增长之间的脱钩关系，测算结果如表 3 所示，研究发现各经济体的脱钩状态存在差异。

中国和印度的“非二”排放量与经济增长之间的脱钩类型稳定较强，在所有观察期内均维持弱脱钩状态，即经济增长随“非二”排放的上升，但排放增速低于经济增速，反映了在经济稳步发展的同时，对“非二”排放控制有一定成效。美国的脱钩状态整体呈弱脱钩特征，但在 1980-1984 年、2000-2004 年和 2005-2009 年三个阶段实现了强脱钩，即经济增长伴随“非二”排放增速的下降，这可能得益于其产业结构优化及对含氟气体等特定气体的管控。

巴西的脱钩关系呈现出弱脱钩与扩张负脱钩交替呈现的状态，且在四个周期内出现“扩张负脱钩”，即经济增长伴随“非二”排放的更快增长。俄罗斯的脱钩状态早期表现为弱负脱钩和弱脱钩，但 2015-2019 年“非二”排放增速加快，进入扩张负脱钩状态，2020-2023 年则转为扩张连接，表明其在协调“非二”排放控制与经济增长方面存在明显波动，需强化相关减排措施以实现更优脱钩。印度尼西亚在 1970-2014 年整体呈现弱脱钩状态，表明该时段其在“非二”排放控制上有显著成效，但是 2015 年之后“非二”排放增速明显增加，呈现出扩张连接状态。

部分经济体经历了剧烈的脱钩状态转型，其中，尼日利亚脱钩状态最不稳定，先后经历了扩张连接、扩张负脱钩、强负脱钩、强脱钩、弱脱钩、扩张负脱钩等多种脱钩状态，这与其经济结构及能源产业发展密切相关。伊朗的波动同样剧烈，经历了衰退脱钩、强负脱钩和多个扩张负脱钩周期，巴基斯坦和墨西哥则长期在弱脱钩、扩张连接或扩张负脱钩状态间摇摆。

总体而言，主要经济体的“非二”排放与经济增长的脱钩路径差异显著，美国在部分年份实现了“非二”排放与经济增长的强脱钩，发展中经济体普遍长期处于弱脱钩状态，而巴西、俄罗斯、尼日利亚、伊朗等资源型经济体的脱钩状态波动性较强，凸显了“非二”排放管理与经济增长协调性的不足。

表 3 主要经济体“非二”排放与经济增长的脱钩状况分析

Table 3 Analysis of decoupling between non-CO<sub>2</sub> greenhouse gas emissions and economic

growth in major economies

经济 体	1970- 1974	1975- 1979	1980- 1984	1985- 1989	1990- 1994	1995- 1999	2000- 2004	2005- 2009	2010- 2014	2015- 2019	2020- 2023
中国	弱脱 钩										
美国	弱脱 钩	弱脱 钩	强脱 钩	弱脱 钩	弱脱 钩	弱脱 钩	强脱 钩	强脱 钩	弱脱 钩	弱脱 钩	弱脱 钩
印度	弱脱 钩										
巴西	弱脱 钩	弱脱 钩	扩张 负脱 钩	弱脱 钩	扩张 负脱 钩	弱脱 钩	扩张 负脱 钩	弱脱 钩	弱脱 钩	扩张 负脱 钩	弱脱 钩
俄罗斯	-	-	-	-	弱负 脱钩	衰退 脱钩	弱脱 钩	弱脱 钩	弱脱 钩	扩张 负脱 钩	扩张 连接
印度 尼西 亚	弱脱 钩	弱脱 钩	弱脱 钩	弱脱 钩	弱脱 钩	强负 脱钩	弱脱 钩	弱脱 钩	弱脱 钩	扩张 连接	扩张 连接
巴基 斯坦	弱脱 钩	弱脱 钩	弱脱 钩	弱脱 钩	弱脱 钩	扩张 连接	弱脱 钩	扩张 连接	扩张 连接	弱脱 钩	扩张 连接
尼日 利亚	扩张 连接	扩张 负脱 钩	强负 脱钩	扩张 连接	扩张 负脱 钩	强脱 钩	强脱 钩	强脱 钩	弱脱 钩	扩张 负脱 钩	强脱 钩
墨西 哥	弱脱 钩	弱脱 钩	强负 脱钩	扩张 负脱 钩	弱脱 钩	弱脱 钩	弱脱 钩	扩张 负脱 钩	弱脱 钩	扩张 连接	弱脱 钩
伊朗	弱脱 钩	衰退 脱钩	扩张 连接	强负 脱钩	扩张 负脱 钩	强脱 钩	弱脱 钩	弱脱 钩	强脱 钩	弱脱 钩	扩张 负脱 钩

1  
2  
3  
4  
5  
6  
7  
8  
9  
10  
11  
12  
13  
14  
15  
16  
17  
18  
19  
20  
21  
22  
23  
24  
25  
26  
27  
28  
29  
30  
31  
32  
33  
34  
35  
36  
37  
38  
39  
40  
41  
42  
43  
44  
45  
46  
47  
48  
49  
50  
51  
52  
53  
54  
55  
56  
57  
58  
59  
60

## 4 结论与建议

本研究系统比较分析了 GCP、UNFCCC 以及 EDGAR 三大全球温室气体排放权威数据集的“非二”排放数据，揭示其在覆盖范围、气体种类、核算方法一致性以及活动数据与排放因子不确定性等方面存在的显著差异。基于 EDGAR 在覆盖完整性、空间分辨率、数据一致性及更新频率方面的综合优势，本文选用 EDGAR 数据集作为核心数据源，对全球主要经济体的“非二”排放特征进行深入分析。主要结论如下：

(1) 全球“非二”排放总量持续上升，且中国的排放量与增长率居于首位。甲烷是排放量最大的“非二”，在温室气体排放清单中具有重要地位。氧化亚氮在除美、俄外的其他主要经济体均呈增长趋势；含氟气体“非二”排放总量中占比最小，但近年来增长速度最快。

(2) 人均“非二”排放量在不同发展水平的经济体间呈现显著差异，突显了在控制总量增长的同时，需兼顾减排责任分担的公平性与技术减排潜力的挖掘。单位 GDP 的“非二”排放量普遍呈递减趋势，表明其深度减排对于实现整体经济碳强度的持续降低至关重要。

(3) 在印度、巴西、巴基斯坦、墨西哥等经济体农业部门长期占据主导地位，是“非二”排放的首要来源。随工业化发展和能源需求增长，中国、俄罗斯和印度尼西亚等经济体从农业排放主导型逐渐转化为能源排放主导型。美国、尼日利亚、伊朗等经济体则维持以能源部门为主导的“非二”排放结构。

(4) 美国在部分年份实现了“非二”排放与经济成长的强脱钩，发展中经济体普遍长期处于弱脱钩状态，巴西、俄罗斯、尼日利亚、伊朗等资源型经济体的脱钩状态波动性较强，表明“非二”排放管控与经济增长协调性的不足。

基于主要数据集“非二”数据质量的不确定性和主要经济体排放情况，为进一步完善全球“非二”排放清单研究，提升减排行动的科学性与针对性，提出以下建议：

完善“非二”核算体系与数据基础。制定更为系统的排放核算标准，构建“非二”监测-报告-核查 (MRV) 全球排放监测体系。建立国家级排放因子数据库，开展高精度温室气体排放清单编制，同时对于非洲、东南亚等数据薄弱地区给予重点支持，通过绿色气候基金等国际气候资金开展稻田甲烷、畜牧业氧化亚氮的

1  
2 本地实测，减少对 IPCC 缺省值的依赖。推动开发多维动态数据的智能核算模型，  
3 建立动态化、本地化的排放因子库与高精度数据集，搭建多尺度网络数据平台。  
4 构建协同监测与校验网络，强化“观测-模型-核算”一体化的协同校验能力，制  
5 定基于 EDGAR、GCP 与 UNFCCC 清单的多源数据交叉验证机制。引入蒙特卡  
6 洛模拟等不确定性量化方法，提升清单编制中数据的一致性和可比性。  
7  
8  
9

10  
11 精准管控关键气体，依据经济体排放特征精准施策。农业主导型经济体（如  
12 印度、巴西）应加快循环型农业体系建设，优先推广水稻间歇灌溉、反刍动物饲  
13 料添加剂及改进粪便管理，控制甲烷和氧化亚氮释放，将农业减排纳入国家自主  
14 贡献目标。能源-农业双主导型经济体（如中国、印度尼西亚）应采用能源与农  
15 业领域双驱并行的甲烷减排策略。在能源排放方面，检测修复油气泄漏和回收逸  
16 散甲烷，推进煤矿瓦斯全浓度梯度利用。在农业减排方面，选育高产低排放种植  
17 品种，加强农作物秸秆高效利用和低碳化处理，完善施肥技术和优化肥料结构，  
18 减少农业甲烷和氧化亚氮的排放。能源主导型经济体(如美国、伊朗)应优先推行  
19 油气全产业链泄漏检测与修复、伴生气回收等具有减排成本效益的技术，设定甲  
20 烷减排目标，采取相对缓和的甲烷减排税费等政策。工业过程增长型经济体（如  
21 中国、美国、俄罗斯）需重点发展氢基炼钢等突破性技术，实施含氟气体 GWP  
22 分级管控。加速履行《基加利修正案》，实施含氟产品全生命周期监管，推动制  
23 冷、半导体等行业技术替代。土地利用排放突出型经济体（如巴西、墨西哥）则  
24 应建立实时卫星监控毁林系统，防控生物质燃烧甲烷和氧化亚氮排放，推广农林  
25 复合经营，提升土壤固碳和固氮能力。  
26  
27  
28  
29  
30  
31  
32  
33  
34  
35  
36  
37  
38  
39  
40

41 强化国际合作与减排技术共享。强化全球协作以提升数据透明度、可比性与  
42 政策协同。统一主要数据库的核算标准，减少方法差异导致的数据偏差。建立跨  
43 国数据共享机制，构建以科学数据为支撑、高效透明的全球排放治理体系。促进  
44 减排责任公平分担与增强技术合作交流，发达国家应加强减排技术研发，通过技  
45 术创新和共享助力发展中国家以低成本实现“非二”温室气体的有效减排。  
46  
47  
48  
49  
50  
51  
52  
53  
54  
55  
56  
57  
58  
59  
60

## 参考文献

- [1] IPCC. Climate change 2022: mitigation of climate change [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2022.
- [2] Ou Y, Iyer G, Fawcett A, et al. Role of non-CO<sub>2</sub> greenhouse gas emissions in limiting global warming[J]. One Earth, 2022.
- [3] Gao J L, Guan C H, Zhang B, et al. Decreasing methane emissions from China's coal mining with rebounded coal production[J]. Environmental Research Letters, 2021, 16(12): 124037.
- [4] Wang Y, Fang M, Lou Z, et al. Methane emissions from landfills differentially underestimated worldwide[J]. Nature Sustainability, 2024, 7(4): 496-507.
- [5] Meng Z, Yan K, Li K, et al. Revealing non-CO<sub>2</sub> GHG emissions in China's transportation networks[J]. Environmental Science & Technology Letters, 2022, 10(2): 124-130.
- [6] Wang Y, Zhu Z, Dong H, et al. Mitigation potential of methane emissions in China's livestock sector can reach one-third by 2030 at low cost[J]. Nature Food, 2024, 5(7): 603-614.
- [7] 刘和平, 马寅, 段华波, 等. 我国氟碳化学品类非二氧化碳温室气体的深度脱碳潜力研究[J]. 环境科学学报, 2024, 44(08): 98-109.
- [8] Khanna N, Lin J, Liu X, et al. An assessment of China's methane mitigation potential and costs and uncertainties through 2060[J]. Nature Communications, 2024, 15(1): 9694.
- [9] 汪笑溪, 李佳珂, 叶蕾, 等. 中国农业非二氧化碳温室气体减排的政策措施、技术应用与对策启示[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2024, 32(11): 1793-1804.
- [10] 刘长松. 非二氧化碳温室气体减排的中国行动、国际经验与政策启示[J]. 阅江学刊, 2024, 16(03): 57-71+173-174.
- [11] 张博, 郭金玲, 高俊莲, 等. 我国甲烷排放控制的中长期挑战与应对[J/OL]. 中国工程科学: 1-13.
- [12] 张博, 郭金玲, 仲冰, 等. 全球甲烷控排行动逻辑、议题博弈与中国对策[J]. 中国科学院院刊, 2024, 39 (12): 2037-2047.

1  
2 [13] Gao J, Guan C H, Zhang B. China's CH<sub>4</sub> emissions from coal mining: A review  
3 of current bottom-up inventories[J]. Science of the Total Environment, 2020, 725:  
4 138295.  
5  
6

7  
8 [14] Tian H, Xu R, Canadell J G, et al. A comprehensive quantification of global  
9 nitrous oxide sources and sinks[J]. Nature, 2020, 586(7828): 248-256.  
10

11 [15] Cai Z C , Tsuruta H , Minami K .Methane emission from rice fields in China:  
12 Measurements and influencing factors[J].Journal of Geophysical Research  
13 Atmospheres, 2000, 105(D13):17231-17242.  
14  
15

16 [16] Zou J, Huang Y, Lu Y, et al. Direct emission factor for N<sub>2</sub>O from rice–winter  
17 wheat rotation systems in southeast China[J]. Atmospheric Environment, 2005, 39(26):  
18 4755-4765.  
19  
20

21 [17] Janssens-Maenhout G, Crippa M, Guizzardi D, et al. EDGAR v4. 3.2 Global  
22 Atlas of the three major greenhouse gas emissions for the period 1970–2012[J]. Earth  
23 System Science Data, 2019, 11(3): 959-1002.  
24  
25

26 [18] Deng Z , Ciais P , Tzompa-Sosa Z A ,et al. Comparing national greenhouse gas  
27 budgets reported in UNFCCC inventories against atmospheric inversions[J].Earth  
28 System Science Data, 2022, 14.  
29  
30

31 [19] Crippa M, Solazzo E, Janssens-Maenhout G,et al. High resolution temporal  
32 profiles in the Emissions Database for Global Atmospheric Research[J].Scientific  
33 Data, 2020, 7.  
34  
35

36 [20] Madrazo J, Clappier A, Belalcazar L C,et al. Screening differences between a  
37 local inventory and the Emissions Database for Global Atmospheric Research  
38 (EDGAR)[J].Science of The Total Environment, 2018, 631(632):934-941.  
39  
40

41 [21] UNFCCC. National inventory submissions 2022: Reporting requirements under  
42 the Paris Agreement[R]. Bonn: United Nations Framework Convention on Climate  
43 Change, 2022.  
44  
45

46 [22] Dils B, Buchwitz M, Reuter M, et al. The greenhouse gas climate change  
47 initiative (GHG-CCI): comparative validation of GHG-CCI SCIAMACHY/ENVISAT  
48 and TANSO-FTS/GOSAT CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> retrieval algorithm products with  
49 measurements from the TCCON[J]. Atmospheric Measurement Techniques, 2014,  
50  
51  
52  
53  
54  
55  
56  
57  
58  
59  
60

1  
2 7(6): 1723-1744.  
3

4 [23] Liu Z, Deng Z, Davis S, et al. Monitoring global carbon emissions in  
5 2022[J].Nature reviews. Earth & environment, 4(4):205-206.  
6

7 [24] Friedlingstein P, O'Sullivan M, Jones M W, et al. Global Carbon Budget  
8 2023[J].Earth System Science Data Discussions, 2023, 15(12):69.  
9

10 [25] IPCC.IPCC Fifth Assessment Report: Climate Change 2014 [EB /OL], 2014.  
11 [http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/syr/SYR\\_AR5\\_FINAL\\_full\\_zh.pdf](http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/syr/SYR_AR5_FINAL_full_zh.pdf).  
12

13 [26] The World Bank. GDP/breakdown at constant 2015 prices in US Dollars (all  
14 countries). <http://data.worldbank.org>.  
15

16 [27] 李阳,陈敏鹏.中国农业源甲烷和氧化亚氮排放的影响因素[J].环境科学学  
17 报,2021,41(02):710-717.  
18  
19  
20  
21  
22  
23  
24  
25  
26  
27  
28  
29  
30  
31  
32  
33  
34  
35  
36  
37  
38  
39  
40  
41  
42  
43  
44  
45  
46  
47  
48  
49  
50  
51  
52  
53  
54  
55  
56  
57  
58  
59  
60