北京林业大学学报
JOURNAL OF BEIJING FORESTRY UNIVERSITY

林业复杂场景下“双碳”颠覆性技术主题识别

安欣 杨禄鑫 徐硕 刘迪航

Topic identification of disruptive technology for “Dual Carbon” in complex forestry scenarios

An Xin, Yang Luxin, Xu Shuo, Liu Dihang

引用本文:
安欣, 杨禄鑫, 徐硕, 刘迪航. 林业复杂场景下“双碳”颠覆性技术主题识别[J]. 北京林业大学学报, 2025, 47(12):12–25. doi: 10.12171/j.1000–1522.20250160
An Xin, Yang Luxin, Xu Shuo, Liu Dihang. Topic identification of disruptive technology for “Dual Carbon” in complex forestry scenarios[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2025, 47(12):12–25. doi: 10.12171/j.1000–1522.20250160

在线阅读 View online: https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20250160

您可能感兴趣的其他文章
Articles you may be interested in

泰湖国家湿地公园天然植物群落碳储量空间分异规律及主控因素研究
Spatial differentiation law and main control factors of carbon storage in natural plant communities of Taihu National Wetland Park of northeastern China
北京林业大学学报, 2023, 45(8): 16–28. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20220045

全球森林碳汇功能评估研究进展
Review on the evaluation of global forest carbon sink function
北京林业大学学报, 2022, 44(10): 1–10. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20220242

中国森林碳汇与林业经济发展耦合及长期变化特征分析
Coupling and long–term change characteristics analysis of forest carbon sequestration and forestry economic development in China
北京林业大学学报, 2022, 44(10): 129–141. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20220257

中国森林树种多样性对土壤碳氮含量的影响
Effects of forest tree species diversity on soil carbon and nitrogen contents in China
北京林业大学学报, 2025, 47(2): 23–31. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20220400

蚂蚁筑巢对纳帕海面山土壤碳积累及分配的影响
Effects of ant colonization on carbon accumulation and distribution in the forests of neighbouring mountains in the Napahai Wetlands, Yunnan Province of southwestern China
北京林业大学学报, 2024, 46(5): 114–125. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20220507

天然次生林碳储量生长模型与固碳能力驱动力研究
Growth model of carbon storage and driving force of carbon sequestration capacity of natural secondary forests
北京林业大学学报, 2023, 45(1): 1–10. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20210265

DOI:10.12171/j.1000−1522.20250160

林业复杂场景下“双碳”颠覆性技术主题识别

安 欣[1] 杨禄鑫[1] 徐 硕[2] 刘迪航[1]
（1. 北京林业大学经济管理学院，北京 100083；2. 北京工业大学经济与管理学院，北京 100124）

摘要:【目的】颠覆性技术是“双碳”战略下林业自主控碳范式构建、绿色技术主导权竞争的关键变量，其识别与培育对推动传统林业向自主控碳转型具有重要现实价值与深远战略意义。本文以精准识别“双碳”领域颠覆性技术为目标，构建系统化识别体系，比较分析单源数据与多源异构数据在技术主题抽取中的适用性，旨在为林业自主控碳等复杂场景下的关键技术挖掘提供可复制、可推广的方法框架，为自主控碳技术清单构建提供支撑。**【方法】**围绕颠覆性技术特征改进现有测度指标体系，采用兼顾单源数据与多源异构数据的 TNG 模型抽取技术主题，计算主题颠覆性指数。结合支撑“双碳”目标的林业（以下简称“林业双碳”）领域知识背景，按“源头减排”“末端治理”两大技术路径，对识别出的颠覆性技术进行分类解读与深入分析。**【结果】**经第三方资料对比验证，本文构建的方法识别效果良好，且多源异构数据融合的识别效果显著优于单源数据。在林业双碳领域，成功识别出核心技术主题——源头减排类（综合能源系统、智能配电网、生物质能减排）、末端治理类（森林土壤固碳技术、热反应二氧化碳捕获、离子液体−碳吸附、复合材料电催化剂制备），覆盖碳减排−碳捕集−碳利用−碳固存全链条，支撑自主控碳林业技术体系构建。**【结论】**本文提出的识别体系在颠覆性技术挖掘中表现出良好的适用性和稳定性，不仅为林业双碳领域“自主控碳转型”提供了精准的技术识别路径与核心技术清单，也为该方法在其他复杂领域的迁移应用提供了理论基础与实践依据。

关键词：主题识别；颠覆性技术；多源异构数据；TNG 模型；颠覆性指数；“双碳”；自主控碳
中图分类号：S718.56；G354.4 **文献标志码：**A **文章编号：**1000−1522(2025)12−0012−14
引文格式：安欣，杨禄鑫，徐硕，等. 林业复杂场景下“双碳”颠覆性技术主题识别［J］. 北京林业大学学报，2025，47(12)：12−25. An Xin, Yang Luxin, Xu Shuo, et al. Topic identification of disruptive technology for “Dual Carbon” in complex forestry scenarios［J］. Journal of Beijing Forestry University, 2025, 47(12): 12−25.

Topic identification of disruptive technology for “Dual Carbon” in complex forestry scenarios

An Xin[1] Yang Luxin[1] Xu Shuo[2] Liu Dihang[1]
(1. School of Economics and Management, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China;
2. School of Economics and Management, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract: ［**Objective**］Disruptive technologies are key variables for the construction of independent carbon control paradigms in forestry and the competition for green technology dominance under the “Dual Carbon” strategy. Their identification and cultivation hold significant practical value and far-reaching strategic significance for promoting the transformation of traditional forestry to independent carbon control. Aiming at the accurate identification of disruptive technologies in the “Dual Carbon” field, this study constructs a systematic identification framework, compares and analyzes the applicability of single-source data and multi-source heterogeneous data in technology topic extraction, and intends to provide a replicable and promotable

收稿日期: 2025−05−06 **修回日期:** 2025−10−09
基金项目: 国家社会科学基金项目（24BTQ066）。
第一作者: 安欣，教授，博士生导师。主要研究方向：环境资源统计、数据挖掘。Email: anxin@bjfu.edu.cn 地址：100083 北京市海淀区清华东路 35 号北京林业大学经济管理学院。
责任作者: 徐硕，教授，博士生导师。主要研究方向：技术预见、数据挖掘。Email: xushuo@bjut.edu.cn 地址：100124 北京市朝阳区平乐园 100 号北京工业大学经济与管理学院。
本刊网址: http://j.bjfu.edu.cn；http://journal.bjfu.edu.cn

methodological framework for the exploration of key technologies in complex scenarios such as forestry independent carbon control, as well as support for the establishment of an independent carbon control technology list. [**Method**] This study improves the existing measurement indicator system based on the characteristics of disruptive technologies, adopts the TNG model (which considers both single-source data and multi-source heterogeneous data) to extract technology topics, and calculates the topic disruptive index. Combined with the knowledge background of the forestry sector for Dual Carbon goals (hereinafter referred to as “forestry Dual Carbon”), the identified disruptive technologies are subjected to classified interpretation and in-depth analysis according to two major technical paths: “source emission reduction” and “end-of-pipe treatment”. [**Result**] Through comparative verification with third-party data, the method constructed in this study exhibits good identification performance, and the identification effect of multi-source heterogeneous data integration is significantly superior to that of single-source data. In the field of forestry Dual Carbon, core technology topics are successfully identified, including those under source emission reduction (integrated energy systems, smart distribution networks, biomass energy emission reduction) and end-of-pipe treatment (forest soil carbon sequestration technology, thermal reaction carbon dioxide capture, ionic liquid-carbon adsorption, composite electrocatalyst preparation). These technologies cover the entire chain of carbon emission reduction, carbon capture, carbon utilization, and carbon sequestration, providing support for the construction of an independent carbon control technology system in forestry. [**Conclusion**] The identification framework proposed in this study demonstrates good applicability and stability in the exploration of disruptive technologies. It not only provides an accurate technical identification path and a list of core technologies for the “independent carbon control transformation” in the forestry Dual Carbon field, but also offers a theoretical foundation and practical basis for the transfer application of this method in other complex fields.

Key words: topic identification; disruptive technology; multi-source heterogeneous data; TNG model; disruptive index; “Dual Carbon” ; independent carbon control

在全球数字化转型持续推进的当下，不同类型、不同来源的数据资源在各行业领域呈现爆发式增长。然而，数据体量的迅猛扩张并未直接转化为价值创造，如何从海量数据中精准提取创新性、突破性信息，成为推动技术变革的关键。颠覆性技术作为打破传统路径依赖，重塑产业竞争格局的核心动力，其孕育过程高度依赖于对关键信息的深度挖掘与跨领域知识的融合。这类技术不仅符合技术演进内在规律，也是应对全球气候变化与可持续发展挑战的重要策略。通过系统识别和提炼关键数据中的颠覆性因素，有望催生驱动行业范式转型的创新路径。具体到“双碳”领域，在“碳达峰、碳中和”目标确立为国家重大战略的背景下，基于关键数据驱动的颠覆性技术提取与应用，已成为推动能源结构优化与生态系统功能提升的重要路径。林业作为自然碳汇的重要组成部分，在碳汇能力提升、生态系统碳循环优化等方面具有重要潜力。通过挖掘支撑“双碳”目标的林业（以下简称“林业双碳”）相关领域的创新性数据与技术资源，可为碳中和技术体系提供有效支撑，助力“双碳”战略目标的加速实现。

近年来，颠覆性技术的识别与评估逐渐构建了一个多维度的指标体系，涵盖了技术自身特征、市场表现以及社会影响等多个方面。从技术特征角度来看，技术增长率通过产出活跃度反映技术的发展速度[1]，融合性指数衡量技术与其他领域技术的融合程度[2]，新颖性指数基于专利主题与引用关系评估技术的独创性[3−5]，而扩张性指数则体现技术在应用范围和市场覆盖方面的扩展能力[6]。在市场与经济方面，市场规模增长率、产业带动效应和市场占有率变化等指标揭示了技术的市场需求与产业影响，体现了技术的经济价值和市场潜力[7]。此外，社会影响力的评估也成为重要维度，其中包括社会关注度、媒体报道频率、社交媒体热度和学术影响力等，旨在衡量技术对公众认知、社会认知转变以及学术界的影响[8]。然而，现有的社会影响力指标存在一定的滞后性，这主要体现在其过度依赖历史数据，难以及时捕捉技术在早期阶段的潜力。在技术处于萌芽阶段时，社会关注度和媒体报道尚未显著增加，这使得这些指标未能有效反映技术的前瞻性特征。因此，社会影响力指标的滞后性显著限制了其在颠覆性技术识别中的作用，尤其是在预测技术的早期颠覆潜力方面。

在文本分析领域，LSA（latent semantic analysis）、GSDMM（Gibbs sampling for the Dirichlet multinomial mixture）和 DTM（dynamic topic model）等模型各自通常仅在单源数据处理应用较多。对于单源数据，LSA 能够基于文本的特点进行语义分析和主题提取，挖掘出文本中潜在的主题[9−10]。GSDMM 假设每个文档只有一个主题，通过 Gibbs 采样算法从数据中推断出主题的数量和每个文档所属的主题[11−12]。DTM 模型适用于分析主题随时间的演变，特别适合于研究主题在不同时间点上的变化趋势[13]。再者，CDTM（common and distinctive topic model）、MCDMAfp 和 COTM（co-occurring topic model）等模型能够有效地从多源异构数据中抽取公共主题，但在处理单一数据源时却存在局限性。安欣等[8]使用改进后的 CDTM 模型，修正了原始 CDTM 模型中各语料库特有主题数量设置相同的缺陷，从学术论文和专利数据两个公共主题分析“双碳”的颠覆性技术。许伟佳等[14]以狄利克雷多项式分配（Dirichlet multinomial allocation，DMA）模型为基础，提出一种新型的多源文本主题模型 MCDMAfp，通过实验发现该模型能够在保留多源异构数据的同时集中每个数据源的独特性，并具有较好的主题发现效果。Yang 等[15]针对网络普遍出现的普通文档和短文本的共现结构，提出了从新闻和评论数据源学习相应主题的 COTM 模型。以上主题模型方法通常存在适用范围受限的问题，或仅针对单源数据开展主题抽取，或专门面向多源异构数据进行设计，难以在不同数据源中灵活迁移与应用，限制了模型的泛化能力。针对这一局限，本文选取 TNG 模型（topic N-gram model）[16]抽取颠覆性技术主题，它兼顾了单源与多源异构数据的处理需求，能够在不同数据结构下稳定实现高效的主题抽取。

面向林业自主控碳的迫切需求，本文将以增长性、创新性及改进的影响力这 3 个核心指标为锚点，搭建一套可复制的颠覆性技术识别体系，并首次把该框架嵌入“双碳”场景，形成领域定制化的识别流程。研究将启用 TNG 模型，对两类数据——融合论文、专利与社会媒体的多源异构数据，以及论文/专利单源数据——分别开展技术主题抽取；在此基础上识别“双碳”领域潜在颠覆性技术，系统验证其效果，并深度解读其中与林业紧密相关的颠覆性技术；最后，系统比较单源与多源异构数据的适用性差异。本研究旨在为林业自主控碳关键技术挖掘提供可复制、可推广的方法框架，同时为构建林业自主控碳技术清单提供直接支撑。

1 颠覆性技术识别体系构建

本文以学术论文、专利数据以及社会媒体数据融合为多源异构数据，借助增长性、创新性、影响力 3 个指标，选用基于 TNG 模型的颠覆性技术识别方法，识别“双碳”领域的颠覆性技术，具体实施步骤如图 1 所示。首先，收集获取学术论文、专利的相关文本数据和基于替代计量数据之一的 Google Trends 的社会搜索量数据。然后对收集到的数据做预处理，包括大小写转化、去停用词和标点符号、分词、词性标记和词形还原等方面；其次，采用 TNG 模型分别抽取多源异构数据主题、学术论文数据主题和专利数据主题，基于抽取的主题结果计算增长率指标，利用 CIM（citation influence model）模型判断学术论文和专利数据与其参考文献主题的继承和创新关系，

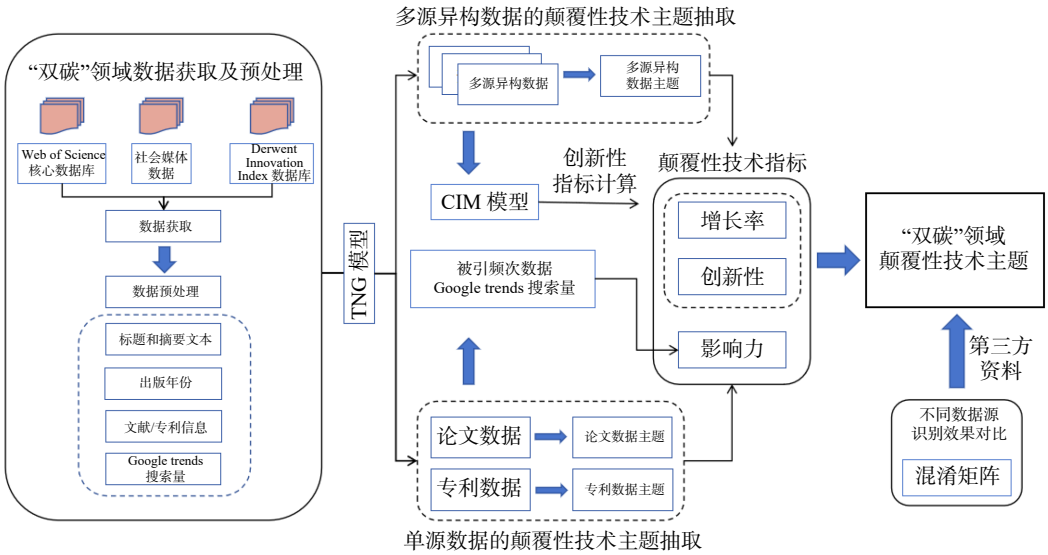


图 1 颠覆性技术识别和实施步骤

Fig. 1 Identification and implementation steps of disruptive technology

再联合主题抽取模型的结果，计算创新性指标，利用被引频次和 Google Trends 数据计算影响力指标，进而计算和识别“双碳”领域颠覆性技术；最后，为进一步验证多源异构数据与单源数据识别效果的差异，基于上述分析结果并结合第三方资料构建混淆矩阵，以验证不同数据源的识别效果。

1.1　主题抽取

本文应用 TNG 模型作为主题抽取的方法。它是一种基于主题模型和 N 元语法模型的文本生成模型，也被称为主题 N 元语法模型。以往主题识别模型大多数由于遵循了标准 LDA 模型的词袋（BoW）假设，只能得到一个有序的单词列表来表示主题含义，但忽视了其语义信息，也就是单词在文本中的位置和上下文联系，导致主题的可读性不强，而 TNG 模型可根据上下文语义自动判断形成 N 元术语，增强了主题的可读性，此外 TNG 模型既可以识别多源异构数据，也可以识别单源数据。因此，本文分别基于多源异构数据和单源数据采用 TNG 模型识别“双碳”领域颠覆性技术，并对其识别效果进行对比，TNG 模型使用的符号如表 1 所示，图形表示如图 2 所示。

1.2　颠覆性技术测度指标

本文采用安欣等[8]对颠覆性技术测度指标中的增长率指标、创新性指标，采用并改进影响力指标，用于衡量颠覆性技术，进而对比验证多源异构数据和单源数据主题抽取的效果。

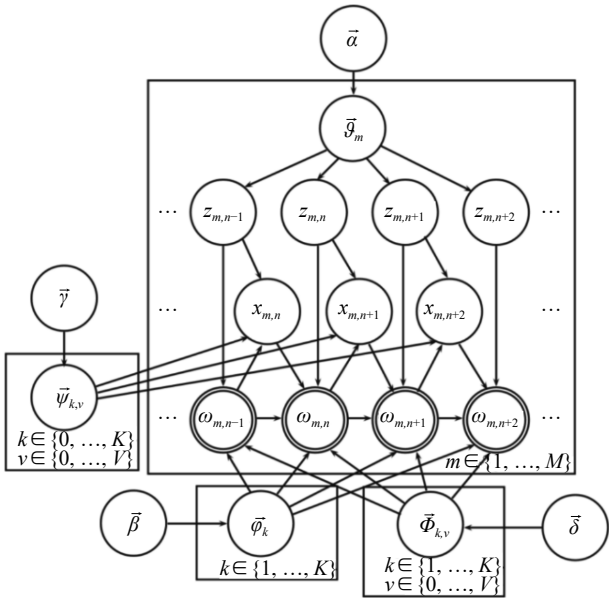
1.2.1　增长率

增长率指标是从时间层面上考虑一项技术的出现和发展，探查技术在其发展轨迹中表现出的“突然性”，用于反映不同年份中各个主题的增长差异，旨在识别出特定时间段内增长较快的主题。增长率指标通过计算每一主题当年与上一年的增长差异来衡量技术的增长情况。

表 1　TNG 模型中用到的变量

Tab. 1　Variables used in the TNG model

变量	含义
K	主题数量
M	文档数量
V	词表数量
N_m	文档m中词汇的数量
$\vec{\vartheta}_m$	文档m的主题多项式分布
$\vec{\varphi}_k$	主题k的词汇多项式分布
$\vec{\psi}_{k,v}$	主题k和词汇v的二元语法状态的二项式分布
$\vec{\phi}_{k,v}$	主题k和词汇v的词汇多项式分布
$z_{m,n}$	文档m中分配给第n个词汇的主题
$x_{m,n}$	文档m中分配给第n个词汇的二元语法状态
$w_{m,n}$	文档m中的第n个词汇
$\vec{\alpha},\vec{\beta},\vec{\gamma},\vec{\delta}$	狄利克雷/贝塔分布先验



双圆圈节点表示观察变量，单圆圈节点表示潜在变量，箭头表示条件依赖，方盘表示内部元素需要重复右下角指定的次数。图中变量解释见表 1。

图 2　TNG 模型的概率模型图

Fig. 2　Probabilistic model diagram for the TNG model

1.2.2　创新性

创新性指标强调颠覆性技术对领域中原有主流技术突破和改进的特征，反映不同年份中目标文献或专利与其参考文献或专利之间的继承与创新关系，旨在识别出与参考文献具有较大差异的主题。创新性指标主要利用 CIM 模型判断学术论文或专利数据对前人研究的继承和突破。该模型的核心价值在于通过引文将主体创新与主题继承相融合，考量参考文献或专利对各主题的相对影响力。基于一阶马尔可夫假设，CIM 模型将每篇施引文献或专利的影响限定于其参考文献列表中的被引文献或专利，借助 Gibbs 采样算法计算继承概率与创新概率，再结合施引文献对主题的多项式分布，先确定单篇文献的创新性，进而汇总为整个主题的创新性指标，突破了传统模型仅关注技术表面特征的限制。

下面是 CIM 模型的符号介绍，并且从生成过程的角度对 CIM 模型进行了描述，如下所示。

（1）对于每个主题$k\in[1,K]$，可以得出$\vec{\varphi}_k\sim\mathrm{Dir}(\vec{\beta})$；

（2）对于每个被引文献$\tilde{m}\in[1,\tilde{M}]$，可以得出$\vec{\vartheta}_{\tilde{m}}\sim\mathrm{Dir}(\vec{\alpha})$；

（3）对于每个被引文献$\tilde{m}\in[1,\tilde{M}]$和每个词汇$\tilde{n}\in[1,\tilde{N}_{\tilde{m}}]$，分别可以得出$\tilde{z}_{m,n}\sim\mathrm{Mult}(\vec{\vartheta}_{\tilde{m}})$，则$\tilde{w}_{\tilde{m},\tilde{n}}\sim\mathrm{Mult}(\vec{\varphi}_{\tilde{w}_{\tilde{m},\tilde{n}}})$；

(4)对于每个施引文献$m \in [1, M]$，可以分别得出$\vec{\psi}_m \sim \text{Dir}(\vec{\delta}_m)$，$\vec{\vartheta}_{\tilde{m}} \sim \text{Dir}(\vec{\alpha})$，以及$\vec{\lambda}_m \sim \text{Beta}(\vec{\mu})$；

(5)对于每篇施引文献$m \in [1, M]$和每个单词$n \in [1, N_m]$，可以得出$s_{m,n} \sim \text{Bern}(\vec{\lambda})$。如果$s_{m,n} = 0$，可以得出$c_{m,n} \sim \text{Mult}(\vec{\lambda})$，则$z_{m,n} \sim \text{Mult}(\vec{\vartheta}_{c_{m,n}})$。反之可以得出，$z_{m,n} \sim \text{Mult}(\vec{\vartheta}_m)$。最后得出$w_{m,n} \sim \text{Mult}(\vec{\varphi}_{z_{m,n}})$。

1.2.3 影响力

文献 [8] 仅将社会媒体数据作为颠覆性技术的影响力指标，它认为如果一项技术具有颠覆性，则该项技术不仅会在科学技术方面产生增长率和创新性等方面的影响，也会在社会媒体中引起一定的“轰动”。但是该文献对影响力指标的度量，却忽略了学界一直使用的学术论文或专利数据的被引频次的影响力。网络社交媒体可以对某个主题领域进行动态持续的关注，体现出技术影响社会的实时性，其中 Google Trends 数据作为一种社会媒体数据，具有被引频次数据所不具备的时效性和敏感性，有助于颠覆性技术更精确的识别和捕捉。相较而言，对出现较新的颠覆性技术来说，被引频次往往存在严重的滞后性，且存在被引次数积累较少的问题。为此，本文使用被引频次未来 3 年后的累积数据作为一部分影响力，特别是将不足 3 年的学术论文或专利数据的被引频次外推至 3 年后积累，再结合 Google Trends 中获取得到的某一关键词某一时期在谷歌搜索引擎中搜索频率，共同表征颠覆性技术的社会影响力指标。改进的影响力指标既避免了被引频次数据产生的滞后性，也综合考虑了社会大众对技术的认知。

改进后的影响力指标反映不同年份中各个主题在科学界和社会媒体的关注度，旨在识别出近几年中受到各界关注度高的主题，通过积累 3 年的学术论文或专利数据的被引频次(如果不足 3 年，则将数据外推至 3 年后累积)，再结合 Google Trends 搜索频率表征影响力指标。

2 颠覆性技术识别在“双碳”领域的应用

2.1 数据获取和处理

本文选取的“双碳”数据来自论文、专利和社会媒体 3 种英文数据源。一是学术论文，选自 Web of Science 的核心数据库中的学术论文数据，包括标题、摘要、作者、出版日期、参考文献等。二是专利数据，选自 Derwent Innovation Index 数据库的专利数据，包括标题、摘要、专利家族、IPC 等。两种数据检索的时间节点都选为 2005—2022 年，共计 18 年。三是社会媒体数据，通过 Google Trends 网站的 API 获取各技术主题的评价指标得分，即利用 Google Trends 网站来获取某一关键词或者话题各个时期下在谷歌搜索引擎中展示的频率及其相关统计数据。需要说明的是，本文使用的社会影响力数据除了社会媒体数据外，还包括论文和专利的被引频次数据。通过检索施引目标文献的数据，可得共有 5 544 292 条被引频次数据，其中论文的被引频次为 5 374 318 条，专利的被引频次为 169 974 条。

在数据获取过程中，构建数据检索式需尽可能全面参考各部门发布的权威资料，例如科技部等九部门联合印发的《科技支撑碳达峰碳中和实施方案(2022—2030 年)》《碳达峰、碳中和精炼报告：政策、趋势、技术、案例、观点及研究方法》《北大金融评论》发布的“双碳”目标下的技术路线图等；同时，将检索式明确划分为“优化碳利用效率”与“增加碳吸收”两个核心方面。其中，优化碳利用效率又可以分为清洁能源替代化石能源发电、制氢和大规模优化配置清洁能源；增加碳吸收可以分为碳汇和碳捕集、利用与封存(CCUS)。具体检索式见表 2，该检索式用于收集学术论文数据和专利数据的信息。通过检索收集，共获得学术论文数据 210 578 篇和专利数据 52 333 篇，将数据存放入 MySQL 数据库中以便后续处理，并对收集到的数据做预处理，包括大小写转化、去停用词、去标点符号、分词、词性标记以及词形还原等。

2.2 基于多源异构数据的识别

2.2.1 颠覆性技术主题识别

经过前期对数据的预处理后，设置 TNG 模型的参数，对称狄利克雷/贝塔分布先验 α, β, γ 和 δ 分别设置为 0.5、0.01、0.1 和 0.01，Gibbs 采样过程运行 1 000 次迭代。利用 TNG 模型识别出多源异构数据的 20 个主题，根据每一主题下频次前 20 的主题词人工研判主题名称。经研判去除两类有关碳储存和离子液体吸附的综述文献类主题，共剩余 18 个主题，重新编号如表 3。

2.2.2 颠覆性技术度量

根据 1.2 中对识别“双碳”领域颠覆性技术的指标设计，依次计算各项指标。

(1)增长率指标

增长率指标通过计算各个技术主题年份间的增长差异，以流行度的斜率来表征不同技术主题之间的相对差异，从而识别出特定时间段内增长突出的技术主题。在 TNG 模型中，特定于学术论文或专利 m 的研究主题 k 呈现出多项式概率分布 $\vec{\vartheta}_m$，根据此概率分布可以得到在一个时间段中，学术论文或专利在主题 k 中出现的概率 $p_{k,t}$，进而得到增长率指标 $\text{growth}_{k,t} = p_{k,t} - p_{k,t-1}$。考虑到主题新颖性特征，如果该主题具备颠覆性，其指标数值将在该时段呈

表 2　“双碳”领域技术检索式

Tab. 2　Technology search form for“double carbon”field

划分	途径	检索式
优化碳利用效率	清洁能源替代化石能源发电、制氢	TS=(“hydrogen* production* techn*” OR “hydrogen* energy” OR “photovoltaic* techn*” OR “nuclear* reactor* techn*” OR “hydropower* techn*” OR “wind* power* techn*” OR “biomass* energy” OR “tidal* energy” OR “clean* energy” OR “renewable* energy”)
	大规模优化配置清洁能源(储能技术、输电技术)	TS=(“energy* storage* techn*” OR “lithium* ion* battery* techn*” OR “solar* cell* techn*” OR “super* capacitor* energy* storage* techn*” OR “electric vehicle technology” OR “fuel cell vehicle technology” OR “photovoltaic* solar* thermal* building* integration* techn*” OR “smart* grid” OR “efficient* electrothermal* conversion* techn*” OR “heat* storage* techn*” OR “intelligent* regulation* techn*” OR “efficient* electric* techn*” OR “power* transmission* techn*”)
增加碳吸收	碳汇	TS=(“low* carbon* techn*” OR “environmental* techn*” OR “green* techn*” OR “zero* carbon* techn*” OR “carbon* reduction* techn*” OR “carbon* neutral* techn*” OR “carbon* offset* techn*” OR “carbon* sink” OR “soil* carbon* sequestration*” OR “carbon* removal* techn*”)
	碳捕集、利用与封存(CCUS)	TS=(“carbon capture” OR “carbon dioxide*capture” OR “carbon dioxide*trap*” OR “CO_2 capture” OR “carbon*separat*” OR “CO_2 separat*” OR “captur* carbon dioxide” OR “captur* CO_2” OR “separat* carbon dioxide” OR “absorb* carbon dioxide” OR “compress* carbon dioxide” OR “carbon*absor*” OR “CO_2 absor*” OR “carbon*compress*” OR “CO_2 compress*” OR ((“solvent regenerat*” OR “solvent recover*”) AND “carbon”)) OR TS=(“carbon storage” OR “carbon sequest*” OR “carbon dioxide*storage” OR “carbon dioxide*sequest*” OR “CO_2 storage” OR “CO_2 sequest*” OR “carbon utiliz*” OR “carbon dioxide* utiliz*” OR “CO_2 utiliz*” OR “carboniz* utiliz*” OR “carbon dioxide*inject*” OR “carbon dioxide*inject*” OR ((“leakage” OR “monitor*”) AND (“carbon dioxide”) AND (“storage” OR “sequest*”)) OR “sequest* carbon dioxide” OR “inject* carbon dioxide” OR “utiliz* carbon dioxide”)

表 3　TNG 模型识别的多源异构数据主题

Tab. 3　Multi-source heterogeneous data themes identified by the TNG model

主题编号	主题名称	主题编号	主题名称
Topic 1	主流电解水制氢技术	Topic 10	离子液体–碳吸附
Topic 2	复合材料电催化剂制备	Topic 11	综合能源系统
Topic 3	生物质能减排	Topic 12	新能源–混合动力系统
Topic 4	太阳能电池板	Topic 13	森林土壤固碳
Topic 5	多孔材料碳吸附	Topic 14	固态储氢能电池
Topic 6	智能配电网技术	Topic 15	有机碳封存
Topic 7	可再生能源系统碳减排	Topic 16	天然气制氢技术
Topic 8	电动汽车动力锂电池技术	Topic 17	热反应二氧化碳捕获
Topic 9	高温热交换	Topic 18	有机溶剂纳滤技术制备

现明显上升的趋势。本文将主题 k 的增长率指标 Growth_k 定义为 $\text{Growth}_k = \sum_{t=2006}^{t=2022} e^{x,t} \times \text{growth}_{k,t}$，其中权重系数$(x, t)$随年份线性递增，自 2006 年的 0.1 递增至 2022 年的 1.7。

每个主题的增长率得分如表 4 所示。综合能源系统和智能配电网技术位居前两位，表明二者在该阶段被学者不断研究，获得学界广泛关注。新能源–混合动力系统这一主题的增长率最低，反映出相关研究已明显降温，存在被逐步边缘化的风险。此外，智能配电网技术、离子液体–碳吸附和热反应二氧化碳捕获主题均排列在前列，共同构成当前的研究前沿集群。

(2)创新性指标

创新性指标沿用安欣等[8]提出的 CIM 模型，量化参考文献或专利 n 对其施引文献或专利 m 的继承与创新概率，分别记为$\lambda_{m,0}$和$\lambda_{m,1}$；再结合 TNG 模型中每一篇施引文献或专利 m 对主题 k 的多项式分布参数$\vartheta_{\zeta,\mathrm{m}}$，可计算每一年主题 k 下的施引文献或专利 m 的创新性 $\text{novelty}_{k,t} = \dfrac{\sum_{m=1}^{m} \text{novelty}_{m,k}}{\sum_{m=1}^{m} \vartheta_{\zeta,\mathrm{m}}}$。在此基础上，整个主题的创新性指标 $\text{Novelty}_k = \sum_{t=2005}^{t=2022} e^{x,t} \times \text{novelty}_{k,t}$，其中，时序权重$(x, t)$自 2005 年的 0.1 线性递增至 2022 年的 1.8。

创新性指标的得分(表 5)显示：复合材料电催化剂制备这一主题的创新性得分最高，太阳能电池板这一主题的创新性指标得分最低。由此可知，太阳能电池板这一主题主要为前人研究基础上的延伸，并未有新的理念、思想或方法的提出。此外，智能配电网技术、离子液体–碳吸附和热反应二氧化碳捕获主题均排列在前列。

(3)影响力指标

影响力指标的构建通常以被引频次为核心表征

表 4 增长率指标得分

Tab. 4 Growth rate indicator scores

主题	增长率(Growth$_k$)	主题	增长率(Growth$_k$)
Topic 1	33 722.87	Topic 10	49 878.89
Topic 2	90 400.97	Topic 11	118 828.20
Topic 3	61 295.21	Topic 12	29 598.93
Topic 4	51 521.86	Topic 13	59 402.41
Topic 5	37 071.35	Topic 14	41 568.78
Topic 6	101 853.60	Topic 15	32 500.96
Topic 7	36 269.26	Topic 16	33 679.42
Topic 8	60 621.19	Topic 17	57 488.73
Topic 9	43 212.02	Topic 18	45 567.74

表 5 创新性指标得分

Tab. 5 Innovative indicator scores

主题	创新性(Novelty$_k$)	主题	创新性(Novelty$_k$)
Topic 1	25 016.95	Topic 10	37 424.58
Topic 2	72 328.85	Topic 11	69 595.85
Topic 3	45 175.68	Topic 12	19 455.83
Topic 4	8 768.90	Topic 13	49 264.04
Topic 5	28 311.29	Topic 14	31 132.80
Topic 6	67 438.16	Topic 15	23 351.13
Topic 7	27 186.40	Topic 16	26 039.30
Topic 8	22 651.45	Topic 17	41 079.99
Topic 9	12 241.17	Topic 18	20 186.04

变量，然而该指标存在天然滞后性。为缓解此问题，学界普遍采用文献发表后累计 3 年的被引数据作为替代。但近期发表文献尚不满 3 年，导致其被引数据不完整。因此，本文结合社会媒体数据 Google Trends 数据，以补充传统引文分析的不足，更全面反映技术的社会影响力。综上，本文采用被引频次与替代计量数据相结合的方法表征影响力指标Impact$_k$。技术主题 k 在时间 t 的被引频次数据为$F'_{k,t}$，使用指数平滑法，外推被引频次数据，将被引频次数据$CF'_{k,t}$都外推至积累 3 年。此外，发生在不同时间的引用影响力价值不同，与发刊年份时间距离越远的引用具有更高的影响力价值[17]，故本文对近 3 年的数据赋予不同的权重，来克服被引频次数据的滞后性。将近 3 年数据分别乘以$e^{0.5}$、$e^{0.5}$和e^{1}的权重得到$F_{k,t}$，每一主题关键词的搜索量为$D_{k,t}$，则每一主题的影响力指标为$\text{impact}_{k,t}=0.8F_{k,t}+0.2D_{k,t}$，其中 0.8 和 0.2 是经多次实验后确定的权重。此方法既可以有效避免只采用被引频次数据的滞后性，又可以打破只使用社会媒体数据的片面性。则整个主题的影响力指标$\text{Impact}_k=\sum_{t=2005}^{t=2022}e^{x,t}\times\text{impact}_{k,t}$，其中，时序权重($x$, t)的取值自 2005 年的 0.1 线性递增至 2022 年的 1.8。

影响力指标得分(表 6)显示：综合能源系统这一主题的影响力指标得分最高，而太阳能电池板这一主题的影响力指标得分最低。由此可见，太阳能电池板这一主题并未引起广泛关注，在这一时间段中这一主题并没有发展的潜力。同样地，智能配电网技术、离子液体−碳吸附和热反应二氧化碳捕获主题均排列在前列。

表 6 影响力指标得分

Tab. 6 Impact indicator scores

主题	影响力(Impact$_k$)	主题	影响力(Impact$_k$)
Topic 1	10 584.45	Topic 10	18 771.72
Topic 2	35 048.44	Topic 11	47 592.81
Topic 3	17 005.27	Topic 12	6 930.27
Topic 4	2 992.57	Topic 13	20 945.57
Topic 5	13 177.74	Topic 14	13 207.32
Topic 6	33 826.50	Topic 15	9 153.26
Topic 7	10 573.94	Topic 16	12 157.94
Topic 8	5 241.09	Topic 17	13 944.50
Topic 9	3 599.58	Topic 18	5 163.26

2.2.3 颠覆性指数得分

对多源异构数据的 3 个指标做熵值法分析，得到的增长率指标、创新性指标、影响力指标的权重分别是 0.39、0.24 和 0.37，据此加权即可算出各主题的颠覆性指数得分(表 7)。若某主题的颠覆性指数得分高于全部主题的均值，即界定为颠覆性技术；表 7 中加粗者即为 TNG 模型依托多源异构数据在“双碳”领域甄别出的颠覆性技术。

2.3 基于单源数据的识别

2.3.1 学术论文数据

类似地，利用 TNG 模型识别学术论文数据的技术主题，得到学术论文数据的 20 个主题，人工研判技术主题，剔除一项有关有机碳汇的综述性主题类别，剩余 19 个主题(表 8)。

将学术论文数据的 3 个指标做熵值法分析，得到的增长率指标、创新性指标、影响力指标的权重分别是 0.29、0.32 和 0.39，据此加权即可算出各主题的颠覆性指数得分(表 9)。表中加粗项即 TNG 模型依据学术论文数据遴选出的“双碳”领域颠覆性技术。

2.3.2 专利数据

同样，以 TNG 模型提取专利数据的 20 个主题后，经人工研判剔除碳吸附−萃取液态碳、高压活性

表 7　多源异构数据融合的颠覆性指数得分

Tab. 7　Disruptive index score for multi-source heterogeneous data fusion

排名	主题	领域主题词	增长率得分	创新性得分	影响力得分	总得分
1	Topic 11	**综合能源系统**	0.394	0.228	0.368	0.990
2	Topic 6	**智能配电网技术**	0.319	0.220	0.254	0.793
3	Topic 2	**复合材料电催化剂制备**	0.268	0.238	0.264	0.771
4	Topic 13	**森林土壤固碳**	0.132	0.152	0.148	0.431
5	Topic 3	**生物质能减排**	0.140	0.137	0.116	0.392
6	Topic 17	**热反应二氧化碳捕获**	0.123	0.121	0.090	0.335
7	Topic 10	**离子液体–碳吸附**	0.089	0.108	0.130	0.327
8	Topic 14	固态储氢能电池	0.053	0.084	0.084	0.221
9	Topic 8	电动汽车动力锂电池技术	0.137	0.052	0.019	0.208
10	Topic 5	多孔材料碳吸附	0.033	0.073	0.084	0.190
11	Topic 7	可再生能源系统碳减排	0.029	0.069	0.063	0.161
12	Topic 16	天然气制氢技术	0.018	0.065	0.076	0.158
13	Topic 1	主流电解水制氢技术	0.018	0.061	0.063	0.142
14	Topic 18	有机溶剂纳滤技术制备	0.070	0.043	0.018	0.131
15	Topic 15	有机碳封存	0.013	0.055	0.051	0.118
16	Topic 4	太阳能电池板	0.097	0.000	0.000	0.097
17	Topic 9	高温热交换	0.060	0.013	0.005	0.078
18	Topic 12	新能源–混合动力系统	0.000	0.040	0.032	0.073

注: 加粗者为甄别出的颠覆性技术。下同。

表 8　TNG 模型识别的学术论文数据主题

Tab. 8　Academic paper data themes identified by the TNG model

主题编号	主题名称	主题编号	主题名称
Topic 1	智能配电网技术	Topic 11	固态储氢能电池
Topic 2	复合材料电催化剂制备	Topic 12	热反应二氧化碳捕获
Topic 3	太阳能集热器	Topic 13	可再生能源系统碳减排
Topic 4	有机碳封存	Topic 14	电力供应控制系统
Topic 5	高温电解制氢	Topic 15	离子液体–碳吸附
Topic 6	薄膜光伏太阳能电池技术	Topic 16	森林土壤固碳
Topic 7	暗发酵制氢	Topic 17	储氢技术
Topic 8	新能源–混合动力系统	Topic 18	化石燃料
Topic 9	综合能源系统	Topic 19	电动汽车动力锂电池技术
Topic 10	多孔材料碳吸附		

炭及电力系统综述类主题，共剩余 17 个主题(表 10)。

对专利数据的 3 个指标进行熵值法分析，得到增长率指标、创新性指标、影响力指标的权重分别是 0.31、0.33 和 0.36，据此加权计算最终得分(表 11)。其中加粗项为 TNG 模型基于专利数据识别出的“双碳”领域颠覆性技术。

3　结果与分析

3.1　混淆矩阵量化评估

前文已从多源异构数据、论文单源数据及专利单源数据 3 条路径析出颠覆性技术主题。为检验结果合理性并比较不同数据源的识别优劣，本文进一步对比基于多源异构数据和单数据源的识别效果。当前，技术识别类研究的效果验证方法相对匮乏，主要依赖第三方资料佐证与专家评判[18–20]。为深入比较两种数据源的技术识别效果，本研究选取领域内相关综述性文献、行业报告等第三方资料作为验证依据，并通过构建混淆矩阵对两类数据的识别效能进行量化评估。

混淆矩阵由 True positive(TP)、True negative(TN)、False positive(FP)、False negative(FN)4 部分组成。其中，TP 表示本文方法识别出该技术是颠覆

表 9 基于学术论文数据的颠覆性指数得分

Tab. 9 Disruptive index score based on academic paper data

排名	主题	领域主题词	增长率得分	创新性得分	影响力得分	总得分
1	Topic 2	**复合材料电催化剂制备**	0.289	0.325	0.385	1.000
2	Topic 19	**电动汽车动力锂电池技术**	0.236	0.214	0.189	0.639
3	Topic 13	**可再生能源系统碳减排**	0.237	0.226	0.168	0.631
4	Topic 9	**综合能源系统**	0.171	0.165	0.291	0.626
5	Topic 6	**薄膜光伏太阳能电池技术**	0.161	0.171	0.274	0.606
6	Topic 15	**离子液体−碳吸附**	0.186	0.174	0.182	0.541
7	Topic 1	**智能配电网技术**	0.136	0.131	0.129	0.396
8	Topic 11	固态储氢能电池	0.104	0.100	0.088	0.291
9	Topic 14	电力供应控制系统	0.108	0.097	0.070	0.275
10	Topic 4	有机碳封存	0.065	0.084	0.082	0.230
11	Topic 18	化石燃料	0.067	0.064	0.079	0.210
12	Topic 8	新能源−混合动力系统	0.078	0.063	0.065	0.206
13	Topic 5	高温电解制氢	0.058	0.054	0.066	0.178
14	Topic 7	暗发酵制氢	0.046	0.046	0.064	0.156
15	Topic 3	太阳能集热器	0.056	0.046	0.054	0.156
16	Topic 10	多孔材料碳吸附	0.061	0.053	0.035	0.149
17	Topic 12	热反应二氧化碳捕获	0.050	0.036	0.038	0.124
18	Topic 17	储氢技术	0.037	0.032	0.030	0.099
19	Topic 16	森林土壤固碳	0.000	0.000	0.000	0.000

表 10 TNG 模型识别的专利数据主题

Tab. 10 Patent data subjects identified by the TNG model

主题编号	主题名称	主题编号	主题名称
Topic 1	生物质能活性碳	Topic 10	综合能源系统
Topic 2	太阳能热交换	Topic 11	有机碳封存
Topic 3	固态储氢能电池	Topic 12	太阳能电池板
Topic 4	电力供应控制系统	Topic 13	天然气蒸汽转化制氢技术
Topic 5	离子液体−碳吸附	Topic 14	热能供应系统
Topic 6	智能配电网技术	Topic 15	厌氧发酵脱氨技术
Topic 7	太阳能电池	Topic 16	薄膜光伏太阳能电池技术
Topic 8	电动汽车内燃机节能技术	Topic 17	锂离子电池技术
Topic 9	新能源−混合动力系统		

性技术，且经过验证确为颠覆性技术；TN 表示本文方法识别出该技术不是颠覆性技术，且经验证确定该技术不是颠覆性技术；FP 表示本文方法识别出该技术不是颠覆性技术，但经验证该技术为颠覆性技术；FN 表示本文方法识别出该技术是颠覆性技术，但经验证该技术不是颠覆性技术。使用混淆矩阵中 TP、TN、FP、FN 这 4 部分所包含技术的个数，计算颠覆性技术识别结果的准确率(A)。

$$A = \frac{N_{TP} + N_{TN}}{N_{TP} + N_{TN} + N_{FP} + N_{FN}}$$

式中：N_{TP}、N_{TN}、N_{FP}、N_{FN} 分别代表混淆矩阵中 TP、TN、FP、FN 这 4 部分所包含的技术个数。

3.1.1 多源异构数据

根据多源异构数据的颠覆性技术识别结果绘制混淆矩阵(图 3)。在“双碳”领域的 18 个颠覆性主题(表 7)中，识别为“真”的技术为 TP 和 TN 之和，共计 13 个，颠覆性技术识别结果的准确率为 72.2%。在基于 TNG 模型的多源异构数据识别结果中，共识别出 7 项颠覆性技术，其中 3 项为 TP，4 项为 FP。经第三方文献 [21−44] 佐证。最终被确认为“双碳”领域的颠覆性技术是智能配电网技术、热反应二氧化碳捕获技术、离子液体−碳吸附技术。

3.1.2 单源数据

基于学术论文单源数据的颠覆性技术识别结果

表 11　基于专利数据的颠覆性指数得分

Tab. 11　Disruptive index score based on patent data

排名	主题	领域主题词	增长率得分	创新性得分	影响力得分	总得分
1	Topic 5	**离子液体–碳吸附**	0.264	0.325	0.365	0.953
2	Topic 13	**天然气蒸汽转化制氢技术**	0.110	0.234	0.273	0.617
3	Topic 6	**智能配电网技术**	0.140	0.213	0.192	0.545
4	Topic 17	**锂离子电池技术**	0.170	0.167	0.195	0.533
5	Topic 2	**太阳能热交换**	0.211	0.112	0.209	0.532
6	Topic 14	**热能供应系统**	0.128	0.153	0.240	0.521
7	Topic 9	**新能源–混合动力系统**	0.173	0.150	0.112	0.435
8	Topic 12	**太阳能电池板**	0.310	0.000	0.065	0.375
9	Topic 3	固态储氢能电池	0.123	0.075	0.130	0.329
10	Topic 10	综合能源系统	0.098	0.097	0.124	0.318
11	Topic 1	生物质能活性碳	0.165	0.053	0.079	0.297
12	Topic 4	电力供应控制系统	0.089	0.064	0.085	0.239
13	Topic 15	厌氧发酵脱氨技术	0.028	0.086	0.063	0.176
14	Topic 11	有机碳封存	0.034	0.075	0.058	0.167
15	Topic 16	薄膜光伏太阳能电池技术	0.115	0.014	0.000	0.129
16	Topic 7	太阳能电池	0.000	0.052	0.041	0.093
17	Topic 8	电动汽车内燃机节能技术	0.005	0.060	0.004	0.068

的准确率为 68.4%，经文献 [21−44] 佐证被确认为“双碳”领域的颠覆性技术是智能配电网技术和离子液体–碳吸附技术。基于专利单源数据的颠覆性技术识别结果的准确率为 70.6%(图 4)。经文献 [21−44] 佐证被确认为“双碳”领域的颠覆性技术是离子液体–碳吸附技术、智能配电网技术、热能供应系统。

3.1.3　基于多源异构和单源数据的识别结果对比

将基于多源异构数据识别出的颠覆性技术主题与分别基于学术论文数据和专利数据的进行比较，汇总使用 TNG 模型识别为“阳性”(P)的颠覆性技术列于表 12。通过不同数据来源的对比分析可知：本文所构建的颠覆性技术识别体系在不同数据源下均表现出良好的识别稳定性，识别效果较好；特别是

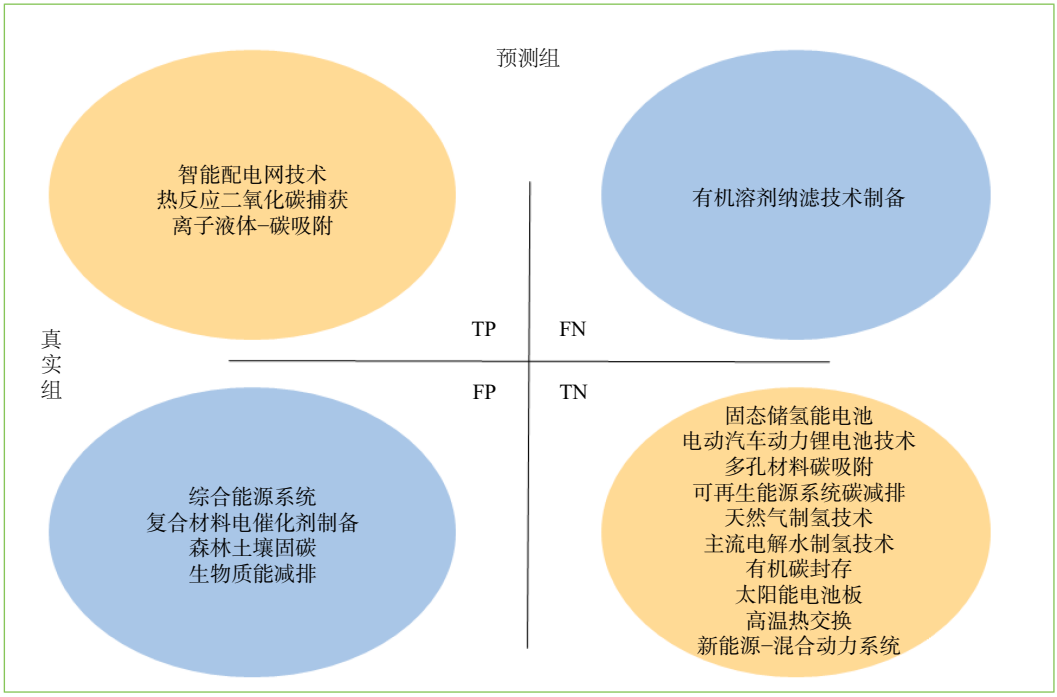


图 3　基于 TNG 模型的多源异构数据识别结果混淆矩阵

Fig. 3　Confusion matrix for recognizing results from multi-source heterogeneous data based on the TNG model

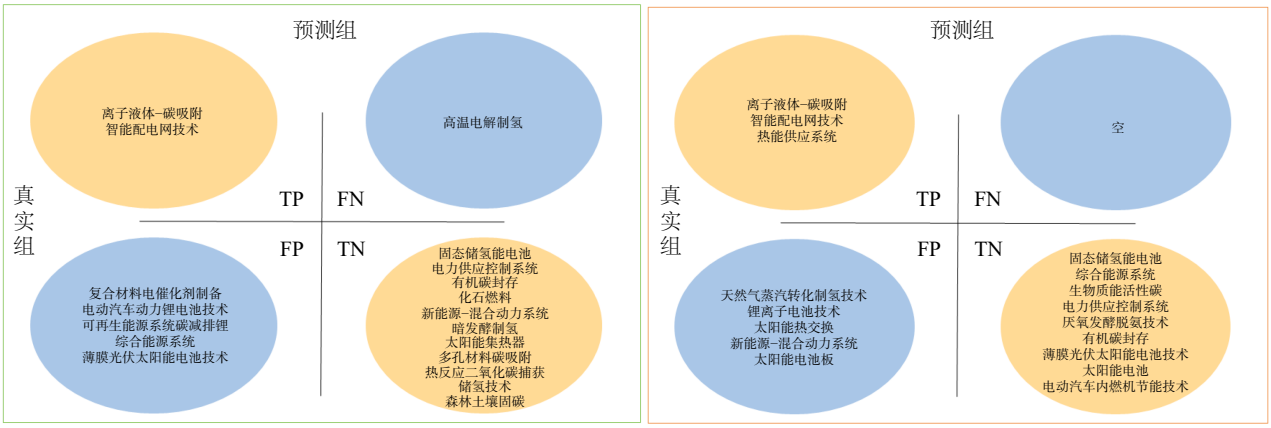


图 4 基于 TNG 模型的单源数据识别结果混淆矩阵

Fig. 4 Confusion matrix for recognizing results from single-source data based on the TNG model

表 12 多源异构数据与单源数据识别颠覆性技术的效果对比

Tab. 12 Comparison of recognition effect of multi-source heterogeneous data and single-source data

数据来源	识别结果	准确率
多源异构数据	综合能源系统、智能配电网技术、复合材料电催化剂制备、森林土壤固碳、生物质能减排、热反应二氧化碳捕获、离子液体–碳吸附	72.2%
学术论文数据	复合材料电催化剂制备、电动汽车动力锂电池技术、可再生能源系统碳减排、综合能源系统、薄膜光伏太阳能电池技术、离子液体–碳吸附、智能配电网技术	68.4%
专利数据	离子液体–碳吸附、天然气蒸汽转化制氢技术、智能配电网技术、锂离子电池技术、太阳能热交换、热能供应系统、新能源–混合动力系统、太阳能电池板	70.6%

基于多源异构数据的识别，能够有效提高识别的准确度，为颠覆性科技创新的识别提供更可靠的支持。

同时，通过不同数据源的识别结果对比（表 12）可以清晰发现，多源异构数据与单源数据在颠覆性技术识别上略有差异。这种差异的根源在于各类数据的属性特征存在本质区别：单源论文数据虽聚焦基础研究与理论突破，能敏锐捕捉技术的科学创新性，但对工程化可行性、商业化潜力的反映较为薄弱，容易高估实验室阶段技术的实际应用价值；单源专利数据则以可保护的技术方案为核心，侧重实用性与排他性，却常因需隐藏核心创新点，局限于局部技术改进，难以完整呈现技术的系统性突破。而多源异构数据通过整合学术论文、专利和新闻媒体 3 类信息，既覆盖了技术从理论探索到开发设计再到落地反馈的全生命周期，又能打破单一数据源的领域局限，从而有效消除单源数据的片面性，最终呈现出更全面、精准的识别结果。

3.2 林业双碳领域颠覆性技术解读

3.2.1 传统林业向自主控碳林业的范式跃迁

在“双碳”战略背景下，林业系统在全球碳循环调控中的关键碳汇功能愈发凸显。然而，传统林业在碳汇方面主要依赖自然固碳，被动接受估值，碳汇作用不明晰且难以调控。技术挖掘的纵向透视显示，这一范式正在发生转变。传统林业的碳汇逻辑是“靠天吃饭”——造林，封育，等待自然生长，碳汇量听凭气候波动，不可预测，不可调控，不可交易。而颠覆性技术识别与分类体系，通过精准锁定“源头减排”与“末端治理”的关键技术集群，助力“被动碳库”升级为可计量、可操控、可交易的“自主控碳平台”，实现从“看天存量”到“技术增量”的根本跃迁。

本研究通过多源异构数据挖掘，识别出具有颠覆潜力的 7 项关键技术——智能配电网、离子液体–碳吸附、热反应二氧化碳捕获、综合能源系统、复合材料电催化剂制备、森林土壤固碳和生物质能减排技术。为系统阐释各技术的作用机制与协同关系，可进一步将其归类为“源头减排”与“末端治理”两大核心技术路径。其中，“源头减排”路径以能源系统优化升级为核心导向：通过综合能源系统构建与智能配电网优化技术提升能源利用效率及可再生能源消纳水平，同时依托生物质能减排技术替代传统化石能源，形成技术成熟度较高的源头减排技术集群。“末端治理”路径则聚焦于已排放二氧化碳的捕获、利用与长效固存，其技术体系涵盖成熟应用层与前沿探索层。在成熟应用层面，森林土壤固碳作为自然增汇途径，与热反应二氧化碳捕获等工业末端治理技术已形成规模化应用基础；在前沿探索层面，离子液体–碳吸附技术依托新材料特性为高效低能耗碳捕集提供新范式，复合材料电催化剂制备技术则为二氧化碳资源化利用开辟关键技术路径。综上，

两大技术路径分别从“控源减碳”与“增汇固碳”维度形成协同效应，构建起覆盖碳减排–碳捕集–碳利用–碳固存的完整技术闭环，促进自主控碳。

3.2.2　传统林业颠覆性技术的范式跃迁

尽管森林土壤固碳技术已进入成熟应用阶段，使得该领域在一定程度上弱化了作为前沿颠覆性技术的探索紧迫性，但这一成熟特征恰好为该领域的深度范式转移提供了契机。该新范式的核心在于可将人工林界定为一个可编程的生物平台，通过多技术集成系统性弥补人工林天然存在的碳储存持久性不足问题。具体技术方向可以包括：通过调控林木特定基因通路，增强根系中栓皮质等难降解物质的生物合成效率，延长碳在生态系统中的留存周期[44]；或通过生物固碳与增强风化等地球化学固碳路径的耦合，提升碳储存的稳定性与总量[45]。与此同时，借助人工智能驱动的遥感监测技术，可将人工林碳储量从传统被动估算值转化为可实现风险评估与实时动态监测的管理资产[46]，进而破解自然固碳过程中固有可控性不足与可验证性弱的关键科学问题。

4　结　　论

在全球格局深刻演变，科技竞争日趋激烈的当下，颠覆性技术已成为驱动科技变革与产业重构的关键变量。构建科学、系统的颠覆性技术识别方法，不仅有助于抢占未来科技发展制高点，也将为国家重大科技战略和产业布局提供决策依据。为此，本文提出了一套基于 TNG 模型的颠覆性技术识别体系，涵盖技术主题抽取、颠覆性指标构建、识别效果评估等核心环节，具有较强的系统性、通用性与适应性。

本研究以“双碳”领域为例，分别基于多源异构数据与单源数据开展技术主题抽取与分析，结合第三方平台绘制混淆矩阵对识别效果进行实证验证。研究结果显示：所构建方法在不同数据源下均表现出良好的识别稳定性与有效性，且多源异构数据识别效果更优；结合林业双碳领域知识（传统林业向自主控碳林业跃迁需求），本研究成功提取出综合能源系统、智能配电网、生物质能减排等源头减排技术，热反应二氧化碳捕获、离子液体–碳吸附、复合材料电催化剂制备等末端治理技术，以及森林土壤固碳技术等典型技术主题。这些技术恰好覆盖“碳减排–碳捕集–碳利用–碳固存”全链条，既验证了该识别体系的可操作性与技术价值，也为自主控碳林业范式构建提供了技术清单支撑。更进一步，上述技术清单并非终点，而是触发传统林业颠覆性技术范式跃迁的起点：以成熟的森林土壤固碳为枢纽，促进源头减排、碳捕集、碳利用与碳固存等多技术的深度融合与协同优化，构建跨尺度、跨场景的协同控汇体系；在标准化的监测—报告—核证与碳资产管理框架下，将人工林从“被动碳库”升级为可计量、可交易、可调控的“可编程碳芯片”（即可按需配置、实时优化的高质量碳汇单元），实现由自然增汇向“技术控汇”的范式跃迁，并为政策制定与项目实施提供可复制、可扩展的路径。

未来，该识别框架可迁移至其他领域以检验其普适性。然而，本研究也存在一定局限性：为比较多源异构与单源数据在颠覆性技术识别中的一致性，本文采用 TNG 模型统一进行主题挖掘，其效果可能逊于仅专注单源或仅专注多源的新兴主题模型。随着信息技术迭代，可引入同时兼容单源与多源数据的先进模型，替代 TNG 模型，实现颠覆性技术识别精度与深度的跃升。

参　考　文　献

[1] 王良, 李牧南. 基于融合新闻影响力和图注意力网络聚类方法的颠覆性技术识别 [J]. 图书情报工 作, 2024, 68(15): 27−43.
Wang L, Li M N. Disruptive technology identification based on news influence and enhanced graph attention network clustering method[J]. Library and Information Service, 2024, 68(15): 27−43.

[2] 李乾瑞, 郭俊芳, 黄颖, 等. 基于专利计量的颠覆性技术识别方法研究 [J]. 科学学研究, 2021, 39(7): 1166−1175.
Li Q R, Guo J F, Huang Y, et al. Research on the method of disruptive technology identification based on patent bibliometrics[J]. Studies in Science of Science, 2021, 39(7): 1166−1175.

[3] 胡泽文, 王梦雅, 韩雅蓉. 基于 LDA2Vec-BERT 的新兴技术主题多维指标识别与演化分析研究——以颠覆性技术领域: 区块链为例 [J]. 现代情报, 2024, 44(9): 42−58.
Hu Z W, Wang M Y, Han Y R. Multidimensional indicator identification and evolution analysis of emerging technology topics based on LDA2Vec-BERT—a case study of blockchain technology in the field of disruptive technology[J]. Journal of Modern Information, 2024, 44(9): 42−58.

[4] 吕鲲, 项旻昊, 靖继鹏. 基于 LDA2Vec 和 DTM 模型的颠覆性技术主题识别研究——以能源科技领域为例 [J]. 图书情报工作, 2023, 67(12): 89−102.
Lü K, Xiang M H, Jing J P. Identification of disruptive technology topics based on LDA2Vec and DTM models: a case study in the energy technology field[J]. Library and Information Service, 2023, 67(12): 89−102.

[5] 徐硕, 李静鸿, 安欣. 基于专利术语的颠覆性技术识别及实证研究 [J]. 图书情报工作, 2024, 68(2): 62−72.
Xu S, Li J H, An X. Disruptive technology identification and empirical study on the basis of patent terms[J]. Library and Information Service, 2024, 68(2): 62−72.

[6] 王海军, 于佳文. 基于专利和微博的颠覆性技术主题识别研究——以人工智能领域为例 [J]. 中国科技论坛, 2024(7): 83−94.

Wang H J, Yu J W. Identification research on disruptive technology topics based on patents and microblogging—an artificial intelligence industry case[J]. Forum on Science and Technology in China, 2024(7): 83−94.

[7] 冯立杰, 秦浩, 王金凤, 等. 融合专利数据与社交媒体数据的潜在颠覆性技术识别——基于深度学习模型 [J]. 情报学报, 2024, 43(2): 181−197.
Feng L J, Qin H, Wang J F, et al. A deep learning approach for identification of potentially disruptive technologies by integrating patent data and social media[J]. Journal of the China Society for Scientific and Technical Information, 2024, 43(2): 181−197.

[8] 安欣, 刘迪航, 徐硕. “双碳”领域颠覆性技术度量与识别——基于多源异构数据融合方法 [J]. 科技进步与对策, 2024, 41(17): 1−11.
An X, Liu D H, Xu S. Measurement and identification of disruptive technologies in the field of “Dual Carbon” based on the method of multi-source data fusion[J]. Science & Technology Progress and Policy, 2024, 41(17): 1−11.

[9] 马雯雯, 魏文晗, 邓一贵. 基于隐含语义分析的微博话题发现方法 [J]. 计算机工程与应用, 2014, 50(1): 96−100.
Ma W W, Wei W H, Deng Y G. Microblog topic detection method based on latent semantic analysis[J]. Computer Engineering and Applications, 2014, 50(1): 96−100.

[10] 王仲远, 程健鹏, 王海勋, 等. 短文本理解研究 [J]. 计算机研究与发展, 2016, 53(2): 262−269.
Wang Z Y, Cheng J P, Wang H X, et al. Short text understanding: a survey[J]. Journal of Computer Research and Development, 2016, 53(2): 262−269.

[11] Agarwal N, Sikka G, Awasthi K L. Evaluation of web service clustering using Dirichlet multinomial mixture model based approach for dimensionality reduction in service representation[J]. Information Processing and Management, 2020, 57(4): 102238−102238.

[12] Qiang H, Jia J S, Kun W, et al. A web service clustering method based on topic enhanced Gibbs sampling algorithm for the dirichlet multinomial mixture model and service collaboration graph[J]. Information Sciences, 2022, 586: 239−260.

[13] Pacho G I, Olmedo B C, Corcho O. Dynamic topic modelling for exploring the scientific literature on coronavirus: an unsupervised labelling technique[J]. International Journal of Data Science and Analytics, 2024: 1−31.

[14] 许伟佳, 秦永彬, 黄瑞章, 等. 基于 DMA 与特征划分的多源文本主题模型 [J]. 计算机工程, 2021, 47(7): 59−66.
Xu W J, Qin Y B, Huang R Z, et al. Multi-source text topic model based on DMA and feature division[J]. Computer Engineering, 2021, 47(7): 59−66.

[15] Yang Y, Wang F, Zhang J, et al. A topic model for co-occurring normal documents and short texts[J]. World Wide Web-internet &Web Information Systems, 2018, 21(2): 487-513.

[16] Wang X, McCallum A, Wei X. Topical n-grams: Phrase and topic discovery, with an application to information retrieval[C]// Seventh IEEE International Conference on Data Mining (ICDM 2007). Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2007: 697-702.

[17] 舒予, 张黎俐. 时序动态视角下的学术影响力评价方法及实证研究 [J]. 现代情报, 2017, 37(11): 74−80.
Shu Y, Zhang L L. An empirical study on the evaluation of academic influence from the perspective of time series[J]. Journal of Modern Information, 2017, 37(11): 74−80.

[18] Wang Q. A bibliometric model for identifying emerging research topics[J]. Journal of the Association for Information Science and Technology, 2018, 69: 290−304.

[19] Small H, Boyack K W, Klavans R. Identifying emerging topics in science and technology[J]. Research Policy, 2014, 43(8): 1450−1467.

[20] Chen C. CiteSpace II: detecting and visualizing emerging trends and transient patterns in scientific literature[J]. Journal of the American Society for Information Science and Technology, 2006, 57(3): 359−377.

[21] Wang Y M, Sun J, He B, et al. Synthesis and modification of biomass derived carbon dots in ionic liquids and their application: a mini review[J]. Green Chemical Engineering, 2020, 1(2): 94−108.

[22] Lu G C, Wang Z, Bhatti U H, et al. Recent progress in carbon dioxide capture technologies: a review[J]. Clean Energy Science and Technology, 2023, 1(1): 1−42.

[23] Sun Q, Wang N, Xu Q, et al. Nanopore-supported metal nanocatalysts for efficient hydrogen generation from liquid-phase chemical hydrogen storage materials[J]. Advanced Materials, 2020, 32(44): 2001818.

[24] 闫文德. 土壤微食物网与森林土壤固碳的进展与思考 [J]. 中南林业科技大学学报, 2023, 43(11): 1−12.
Yan W D. Research advance and reflection on soil micro-food webs and soil carbon sequestration in forests[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2023, 43(11): 1−12.

[25] Carvalhais N, Forkel M, Khomk M, et al. Global covariation of carbon turnover times with climate in terrestrial ecosystems[J]. Nature, 2014, 514: 213−217.

[26] Villarino S H, Pinto P, Jackson R B, et al. Plant rhizodeposition: a key factor for soil organic matter formation in stable fractions[J]. Science Advances, 2021, 7(16): eabd3176.

[27] Lajtha K, Bowden R D, Crow S, et al. The detrital input and removal treatment (DIRT) network: insights into soil carbon stabilization[J]. Science of the Total Environment, 2018, 640: 1112−1120.

[28] 罗先武, 叶维祥, 宋雪漪, 等. 支撑“双碳”目标的未来流体机械技术 [J]. 清华大学学报 (自然科学版), 2022, 62(4): 678−692.
Luo X W, Ye W X, Song X Y, et al. Future fluid machinery technology supporting dual carbon goals[J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2022, 62(4): 678−692.

[29] Cao S, Zhou G, Cai Q, et al. A review of solar cells: Materials, policy-driven mechanisms and application prospects[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2022, 39(5): 1847−1858.

[30] 樊静丽, 李佳, 晏水平, 等. 我国生物质能−碳捕集与封存技术应用潜力分析 [J]. 热力发电, 2021, 50(1): 7−17.
Fan J L, Li J, Yan S P, et al. Application potential analysis of bioenergy carbon capture and storage technology in China[J]. Thermal Power Generation, 2021, 50(1): 7−17.

[31] 许邵帅, 崔文静, 白杰, 等. 碳化钼基析氢反应电催化剂的制备

及改性研究进展 [J]. 功能材料, 2023, 54(12): 12056−12067.
Xu S S, Cui W J, Bai J, et al. Research progress on preparation and modification of molybdenum carbide-based electrocatalyst for hydrogen evolution reaction[J]. Journal of Functional Materials, 2023, 54(12): 12056−12067.

[32] 庄冠群, 张懿夫, 张海锋, 等. 综合能源系统研究综述 [J]. 吉林电力, 2022, 50(05): 13−19.
Zhuang G Q, Zhang Y F, Zhang H F, et al. Summary of research on integrated energy system[J]. Jilin Electric Power, 2022, 50(5): 13−19.

[33] 《中国公路学报》编辑部. 中国汽车工程学术研究综述·2023[J]. 中国公路学报, 2023, 36(11): 1−192.
Editorial Department of China Journal of Highway and Transport. Review on China’s automotive engineering research progress: 2023[J]. China Journal of Highway and Transport, 2023, 36(11): 1−192.

[34] 蒋敏华, 肖平, 刘入维, 等. 氢能在我国未来能源系统中的角色定位及“再电气化”路径初探 [J]. 热力发电, 2020, 49(1): 1−9.
Jiang M H, Xiao P, Liu R W, et al. A preliminary study on the role of hydrogen energy in China’s future energy system and the route of re-electrification[J]. Thermal Power Generation, 2020, 49(1): 1−9.

[35] 鲁军辉, 王随林, 唐进京, 等. 可再生能源与余热协同辅助碳捕集技术研究现状与展望 [J]. 华电技术, 2021, 43(11): 97−109.
Lu J H, Wang S L, Tang J J, et al. Research status and prospect of carbon capture technology synergistically assisted by renewable energy and waste heat[J]. Huadian Technology, 2021, 43(11): 97−109.

[36] Bin C, Heping X, Tao L, et al. Principles and progress of advanced hydrogen production technologies in the context of carbon neutrality[J]. Advanced Engineering Science, 2022, 54(1): 106-116.

[37] 刘文超, 陈可可, 孙颖, 等. 高性能纳滤膜的制备及性能研究 [J]. 水处理技术, 2022, 48(12): 33−36.
Liu W C, Chen K K, Sun Y, et al. Preparation and performance study of high-performance nanofiltration membranes[J]. Technology of Water Treatment, 2022, 48(12): 33−36.

[38] 吉桂明. 高温气冷反应堆核电站紧凑型热交换设备的设计和研究 [J]. 热能动力工程, 2014, 29(6): 739.
Ji G M. Design and research of compact heat exchange equipment for gas-cooled reactor nuclear power plants[J]. Journal of Thermal Power Engineering, 2014, 29(6): 739.

[39] Nauman M . 混合新能源控制系统的模拟研究 [D]. 南京: 东南大学, 2020.
Nauman M. A simulation study on control of hybrid renewable energy system[D]. Nanjing: Southeast University, 2020.

[40] 顾祥红, 彭齐鑫. 太阳能集热器和空气源热泵联合供暖的研究现状 [J]. 大连大学学报, 2020, 41(3): 24−27.
Gu X H, Peng Q X. Research status of solar collector and air source heat pump combined heating[J]. Journal of Dalian University, 2020, 41(3): 24−27.

[41] 杨凯鹏. 氢能技术现状及其在储能发电领域的应用 [J]. 化工设计通讯, 2023, 49(7): 157−159.
Yang K P. Current situation of hydrogen energy technology and its application in the field of energy storage and power generation[J]. Chemical Engineering Design Communications, 2023, 49(7): 157−159.

[42] 赵常宝, 常浩. 天然气制氢工艺技术研究进展 [J]. 化工设计通讯, 2022, 48(4): 96−98.
Zhao C B, Chang H. Research progress on hydrogen production technology from natural gas[J]. Chemical Engineering Design Communications, 2022, 48(4): 96−98.

[43] 李乐媛. 生物质基制备超级活性碳及其电化学性能研究 [D]. 北京: 北京化工大学, 2020.
Li L Y. Study on preparation of super activated carbon from biomass and its electrochemical properties[D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2020.

[44] Khan U M, Rana I A, Shaheen N, et al. Comparative phylogenomic insights of KCS and ELO gene families in *Brassica* species indicate their role in seed development and stress responsiveness[J]. Scientific Reports, 2023, 13(1): 3577.

[45] Lee J J, Plante L, Pian B, et al. Bio-accelerated weathering of ultramafic minerals with *Gluconobacter oxydans*[J]. Scientific Reports, 2025, 15(1): 15134.

[46] Liu L, Zhou W, Guan K, et al. Knowledge-guided machine learning can improve carbon cycle quantification in agroecosystems[J]. Nature Communications, 2024, 15(1): 357.

（责任编辑　吴　娟
责任编委　陈志泊）