中国农业大学学报 2026,31(11):284-298
Journal of China Agricultural University http://zgnydxxb.ijournals.cn

钱晨晨,张航,谢易文,邵金华,牛光辉,黄国勤. 中国稻田温室气体研究进展:基于CiteSpace文献计量分析[J]. 中国农业大学学报,2026,31(11):284-298.
QIAN Chenchen,ZHANG Hang,XIE Yiwen,SHAO Jinhua,NIU Guanghui,HUANG Guoqin. Research progress of greenhouse gases in paddy fields in China: Based on CiteSpace bibliometric analysis[J]. *Journal of China Agricultural University*,2026,31(11):284-298.
DOI: 10.11841/j.issn.1007-4333.2026.11.22

# 中国稻田温室气体研究进展:基于CiteSpace文献计量分析

钱晨晨[1] 张 航[1] 谢易文[1] 邵金华[2] 牛光辉[3] 黄国勤[1*]

(1. 江西农业大学 生态科学研究中心,南昌 330045;
2. 广西壮族自治区水利科学研究院,南宁 530023;
3. 钦州市灌溉试验站,广西 钦州 535017)

**摘 要** 为系统揭示中国稻田温室气体排放领域的研究现状、热点演变与合作网络,基于中国知网学术期刊数据库,利用CiteSpace软件,对国内中文文献在稻田温室气体领域的相关研究进行文献计量分析。结果表明:1)受国内外形势和政策影响,我国稻田温室气体研究的发文数量具有阶段性特征,分为起步探索阶段、快速发展阶段和稳定发展阶段;2)研究机构多为涉农高校和科研院所,研究机构和学者较多,但机构间和学者间的合作较少,未来需进一步加强交流合作;3)研究内容较广泛且不断深化,主要集中于温室气体的排放特征、影响因素及减排措施等方面,其中"碳中和""碳足迹""再生稻""稻虾共作"等是目前研究的热点方向。本研究对中国稻田温室气体领域研究现状和发展趋势的分析,有助于识别当前研究热点问题,既可为研究者拓展研究方向提供理论参考,也可为相关政策制定者出台温室气体减排政策提供依据。

**关键词** 中国;稻田;温室气体;CiteSpace;文献计量分析
**中图分类号** S19 **文章编号** 1007-4333(2026)11-0284-15 **文献标志码** A

# Research progress of greenhouse gases in paddy fields in China: Based on CiteSpace bibliometric analysis

QIAN Chenchen[1], ZHANG Hang[1], XIE Yiwen[1], SHAO Jinhua[2],
NIU Guanghui[3], HUANG Guoqin[1*]

(1. Research Center on Ecological Science, Jiangxi Agricultural University, Nanchang 330045, China;
2. Guangxi Hydraulic Research Institute, Nanning 530023, China;
3. Qinzhou Irrigation Experiment Station, Qinzhou 535017, China)

**Abstract** To systematically reveal the research status, hotspot evolution and collaboration networks of paddy field greenhouse gas emissions in China, bibliometric analysis was conducted on relevant Chinese literature retrieved from the CNKI academic journal database using CiteSpace software. The results show that: 1) Due to the influence of domestic and international developments as well as relevant policies, the annual publication output of domestic research on paddy greenhouse gas emissions presents obvious phased characteristics, which is divided into initial exploration stage, rapid development stage and stable development stage. 2) Research institutions are mostly agricultural universities and research institutes, with a large number of research institutions and scholars, but there is relatively little cooperation between institutions and scholars. In the future, it is necessary to further strengthen exchanges and cooperation. 3) The research content is extensive and

收稿日期:2025-12-04;接受日期:2026-04-03
基金项目:国家重点研发计划(2016YFD0300208);国家自然科学基金项目(41661070);中国工程院咨询研究项目(2017-XY-28-03)
第一作者:钱晨晨(ORCID:0009-0009-3057-4009),博士研究生,E-mail:827431622@qq.com
通讯作者:黄国勤(ORCID:0009-0004-3159-7644),教授,主要从事耕作制度、农业生态、农业可持续发展研究,E-mail:hgqmail441@sohu.com

deepening, mainly focusing on the emission characteristics, influencing factors and emission reduction measures of greenhouse gases. Among them, "carbon neutralization" "carbon footprint" "ratoon rice" "rice-shrimp co-cropping" are currently hot research directions. This study summarizes the research progress and developmental trends of China's paddy field greenhouse gas research, which can help identify current hot research topics. The findings offer theoretical references for researchers to expand research dimensions and furnish evidence for policymakers to design targeted greenhouse gas mitigation policies.

**Keywords**　China; paddy field; greenhouse gases; CiteSpace; bibliometric analysis

目前，全球气候变暖的深刻影响广泛涉及生态平衡、社会经济发展以及人类的生存根基[1-3]，而温室气体排放作为驱动气候变暖的核心因素[4]，在大气中的浓度持续攀升，引起了国际社会的高度关注与深切忧虑。

农业是全球温室气体的来源和汇，农业集约化持续加剧温室气体排放[5]。稻田作为农业生态系统重要的组成部分，为全球半数人口提供主粮，其温室气体排放量约占农田总排放量的48%[6]。中国是世界上最大的水稻生产国[7]，一项基于我国不同耕作制度下温室气体排放特征的综合比较发现[8]，在所研究的7种主要种植系统中，单季稻和双季稻是温室气体排放的最大贡献者，两者合计占粮食作物总排放量的一半以上，是排放的主要来源，且其单位面积排放强度显著高于其他旱地作物系统。早在20世纪初，陈宗良等[9]就对北京地区稻田甲烷排放通量进行了测定，结果表明稻田甲烷排放受到多种因素影响，其中农业管理措施的影响最为显著，淹灌处理和有机肥料会明显促进甲烷排放。灌溉和施肥是确保高产的2种较常见做法，如何平衡水稻生产和温室气体减排，实现两者之间的协同增效逐渐成为研究的热点问题[10]。Yang等[11]研究发现，25%绿肥替代率在交替湿润和干燥条件下温室气体排放量最低，且稻谷产量较高。Yao等[12]通过整合全球不同灌溉和氮肥施用条件下的数据，运用机器学习模型进行分析，优化了我国稻田的水肥管理措施，发现我国南方在实施节水灌溉和提高稻米产量方面潜力更大，而北方地区则表现出更高的温室气体减排潜力。不同的农业种植制度也同样影响着温室气体排放[13]，Peng等[14]研究表明不同轮作系统结合节水灌溉提高了稻田土壤有机碳含量，增加了碳输入，改变了微生物群落结构和代谢功能，对温室气体排放具有显著调节作用。不同农业区域稻田温室气体排放也存在较大差异[15]，如长江中下游平原排放量较高，青藏高原最低，但随着"北粮南运"，耕地位移导致温室气体排放的空间转移，碳排放压力逐渐从东部向西北、东北转移[16]。

我国稻田温室气体的研究主要围绕其排放特征[17]、估算方法[18]、监测技术[19]、影响因素[20]和减排措施[21-22]等内容，现已取得了丰硕的研究成果，但该领域的研究热点和前沿问题尚未明确，亟须进行系统梳理。传统叙述性综述以文字描述为主，依赖个人经验，掺杂了主观评述，缺乏对研究领域的整体客观分析。文献计量学是定量分析学科领域发展态势的重要方法之一，通过对文献内容和结构特征的量化分析，能够客观梳理研究领域的发展脉络，可实现数据可视化，极大提高了分析效率。因此，本研究运用CiteSpace 6.4.R1软件，对1991—2024年中国稻田温室气体领域的中文文献进行知识图谱分析，旨在系统梳理该领域的研究现状、演进脉络与前沿热点，以期为后续研究提供参考。

## 1　数据来源与方法

### 1.1　数据来源及检索策略

本研究以中国知网（CNKI，https://www.cnki.net/）学术期刊数据库为数据源，旨在系统揭示我国稻田温室气体排放领域的研究现状、热点演变与合作网络。CNKI作为国内收录期刊最全面、体系最完整、历史数据最权威的核心数据库，其收录的核心期刊与重要出版物基本涵盖了该领域的主流高质量成果，因此CNKI能够较好地满足这一分析需求。为聚焦分析并避免重复计数带来的偏差，本研究未纳入万方、维普等数据库，仅以CNKI单一数据库作为分析来源。

在CNKI数据库高级检索项中以"稻田"和"温室气体"为主题词进行检索，时间跨度定为1991年1月1日—2024年12月31日。按照上述检索条件共得到1 504条结果，手动剔除不相关或勘误文件等无效结果，最终将得到的1 149篇文献作为数据分析样本。

### 1.2 研究方法

将最终得到的样本文献从CNKI数据库下载后，以Refworks格式保存，导入到CiteSpace 6.4.R1软件中进行数据处理分析。文献样本数据通过Citespace 6.4.R1软件内置的“Alias”功能实现，在project文件夹下创建txt文件（命名citespace.alias），按“原始词 目标词”格式逐条写入合并规则，软件在运行时会自动将原始词替换为目标词进行共现计算。参数设置如下：1）时间范围设定为1991年1月—2024年12月，时间切片为1年；2）节点筛选采用g-index算法，$k$=20；3）分析节点包括机构、合作作者、关键词；4）采用“Pathfinder-综合网络整体”方式进行裁剪；5）其他参数保持默认设置。

本研究采用g-index（$k$=20）进行节点筛选。该指标是基于被引累积分布设计，既可保留高频节点，也能识别频次不高但累积影响力显著的关键词。$k$=20是CiteSpace文献计量研究中常用的经验值，当$k$=20时，聚类模块值（$Q$=0.829 5）和平均轮廓值（$S$=0.965 5）均处于最优区间，参数设置合理可靠。

在不同的网络图谱中，节点分别代表作者、机构或者关键词。节点的大小代表出现的频次，节点越大表示出现的频次越高，在该领域的影响力越大或与主题相关性越大。节点颜色代表出现的时间。连接节点的线条表示两者相关联，线条越粗表示关系越紧密。

## 2 文献计量结果与分析

### 2.1 发文量分析

CNKI每年收录的文献量可直接反映稻田温室气体研究的年度分布特征以及发展态势。1991—2024年我国稻田温室气体相关研究领域发文量见图1。不同年份稻田温室气体研究领域发文量有较大差异，从整体发展来看，2005年之前发文量较少，2005年开始发文量逐渐增多，经过一段时间的持续增长近年来趋于稳定，大致可分为以下3个阶段：1）起步探索阶段（1991—2004年）。这一阶段发文数量较少，共计34篇，年发文量均不超过10篇，平均仅2.4篇/年，占总分析样本的2.96%。该阶段全球对温室气体排放问题的关注逐渐升温，我国也开始意识到稻田作为重要的农业生态系统，在温室气体排放方面可能具有特殊性，开始引起研究者的关注。2）快速发展阶段（2005—2019年）。该阶段有关稻田温室气体研究的文献数量总体呈增长趋势，平均为42篇/年，该阶段总发文量占总分析样本的54.83%，年发文量在2018年达到峰值（80篇）。这一阶段较起步探索阶段发文量增幅明显，表明我国对稻田温室气体减排的重视程度不断提高。20世纪末至21世纪初，我国稻田温室气体相关研究成果存量有限、研究基础较为薄弱，使得2005—2010年的发文量增幅偏缓。3）稳定发展阶段（2020—2024年）。这一阶段有关稻田温室气体的发文量较前2个阶段有所增加，且年发文量较为稳定，平均为97篇/年，发文量占总分析样本的42.21%。2020年，我国提出“双碳”目标，对农业温室气体减排提出了更高要求，这一阶段稻田温室气体领域的研究顺应了国际和国内的发展趋势，备受研究者关注。

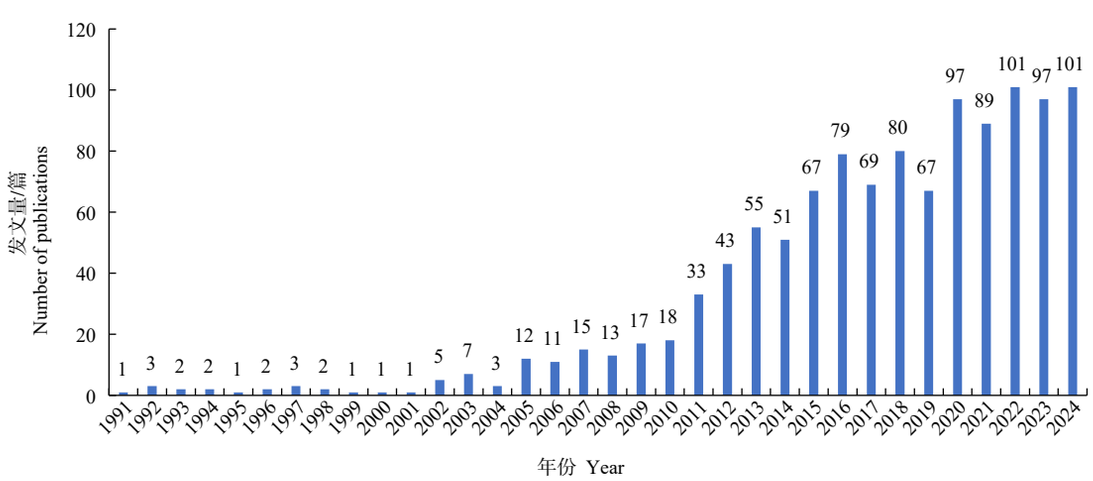



**图1 1991—2024年我国稻田温室气体相关研究领域发文量**

Fig. 1 Number of papers on paddy greenhouse gas research in China from 1991 to 2024

### 2.2　合作机构分析

为探明我国稻田温室气体研究领域的领先机构，本研究基于1 149篇文献开展发文机构统计分析，结果显示相关研究来自257家单位，农业类高校和涉农科研院所占据核心地位。其中高校（$n$=103）占比40.08%，科研院所（$n$=83）占比32.30%；其余发文单位包括其他事业单位（$n$=42）、企业（$n$=15）与政府部门（$n$=14），分别占比16.34%、5.84%和5.45%。由表1可知，1991—2024年发文量位居前3的研究机构分别是南京农业大学（159篇）、中国农业科学院（97篇）和华中农业大学（91篇）。上述机构在该领域较为活跃，研究成果积累较多、影响力较大。

**表1　我国稻田温室气体研究领域发文研究机构与发文量统计（排名前10）**

Table 1　Statistics on publication output and affiliated research institutions of paddy greenhouse gas research in China（Top 10）

| 排名 Rank | 机构名称 Name of research institution | 发文量/篇 Number of publications | 首次发文年份 Year when the institution first appeared |
|---|---|---|---|
| 1 | 南京农业大学 | 159 | 1999 |
| 2 | 中国农业科学院 | 97 | 1993 |
| 3 | 华中农业大学 | 91 | 2007 |
| 4 | 湖南农业大学 | 59 | 2004 |
| 5 | 南京信息工程大学 | 47 | 2011 |
| 6 | 扬州大学 | 46 | 2010 |
| 7 | 浙江大学 | 44 | 1996 |
| 8 | 江西农业大学 | 37 | 2012 |
| 9 | 中国科学院南京土壤研究所 | 31 | 2009 |
| 10 | 中国科学院大学 | 29 | 2005 |

本研究共识别出257个机构节点，存在220条连线，网络密度为0.006 7，表明领域内以同学科和同院校间合作为主，不同学科和院校之间合作较弱，大量机构仍处于独立开展研究的状态。采用文献计量学中通用的高频筛选法界定核心机构，即选取累计发文量占比达到50%的机构划定为核心机构。经统计，发文量排名前8位的机构文献占比合计为50.48%，据此将其确定为本领域核心机构（图2）。

### 2.3　合作作者分析

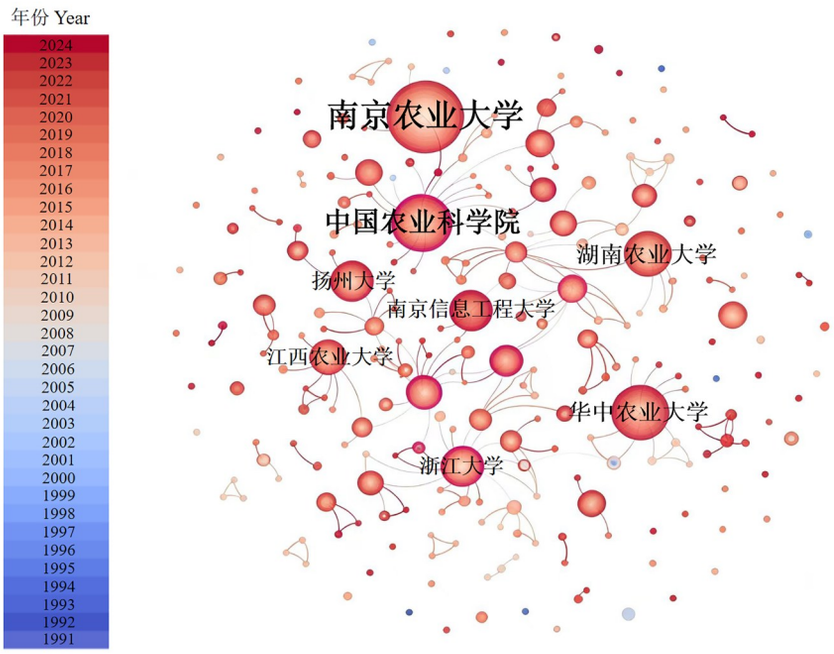
为识别在我国稻田温室气体研究领域最具影响力的研究者，本研究对该领域发文作者开展统计分析，依据作者发文量进行排序，高频作者如表2所示。统计结果显示，发表文献最多的作者是中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所的万运帆（16篇），其次是同单位的李玉娥（12篇）和湖南农业大学的傅志强（12篇），此外该所的秦晓波和中国科学院南京土壤研究所的徐华发文量均在10篇以上，是该领域的主要研究力量。

作者合作网络图谱共包含548个节点，714条连线，密度为0.004 8，说明研究者之间合作较为松散。根据普赖斯定律中核心作者计算公式：$M=0.749\times\sqrt{N_{max}}$（式中：$M$为核心作者最低发文量，$N_{max}$为发文最多作者的发文量），将$N_{max}$=16代入，得出$M$=2.996。因此，将发文量≥3篇的作者认定为核心作者（图3）。核心作者共现图谱显示，高频发文作者多以单位为单元形成集群，关联度较强的万运帆、李玉娥、秦晓波和高清竹等均来自中国农业科学院；曹凑贵、李成芳、刘天奇和展茗等来自华中农业大学；傅志强、龙攀、徐莹和钟娟等来自湖南农业大学。作者之间的合作主要集中于同一单位，表明未来应进一步加强跨地区、跨院校的学术交流。

## 3　研究热点

### 3.1　关键词共现分析

基于关键词共现分析，能够有效识别领域内过去和当前的研究热点。将节点类型设置为关键词，




节点大小与发文量成正比，节点越大，表示发文量越多；节点中心颜色代表机构首次发文年份；节点间的连线代表机构间存在合作发文关系，连线越粗，表示合作频次越高。图3同。

The size of each node is proportional to its publication output, larger nodes indicate more published papers. Each node denotes the first publication year of the corresponding institution. Links between nodes represent cooperative publications, and thicker links signify higher cooperation frequency. The same applies in Fig. 3.

**图2 我国稻田温室气体研究领域核心发文机构共现图谱**

Fig. 2 Co-occurrence map of core publishing institutions on paddy greenhouse gas research in China

**表2 我国稻田温室气体研究领域作者发文量(排名前10)**

Table 2 Number of publications by authors on paddy greenhouse gas research in China (Top 10)

| 排名 Rank | 姓名 Author name | 发文量/篇 Number of publications | 首次发文年份 First published time |
|---|---|---|---|
| 1 | 万运帆 | 16 | 2006 |
| 2 | 李玉娥 | 12 | 1993 |
| 2 | 傅志强 | 12 | 2010 |
| 4 | 秦晓波 | 11 | 2005 |
| 4 | 徐华 | 11 | 2009 |
| 6 | 马静 | 9 | 2018 |
| 6 | 曹凑贵 | 9 | 2008 |
| 8 | 张卫健 | 8 | 2009 |
| 8 | 江瑜 | 8 | 2013 |
| 10 | 李成芳 | 7 | 2009 |

绘制关键词共现图谱(图4)，图中共有465个节点、643条连线。剔除检索限定词“稻田”和“温室气体”后，图中节点代表了稻田温室气体领域的关注热点。节点大小对应出现的频次，带有紫色边框的节点代表其中介中心性较高。对高频次关键词和高中心性关键词的分析可进一步了解我国稻田温室气体的研究前沿和关注焦点。由表3可知，“甲烷”“产量”“水稻”“氧化亚氮”“秸秆还田”“稻田土壤”和“固碳减排”等兼具高频次和高中心性，在一定程度上代表了具备“高热度”和“高关联度”的双重特征。

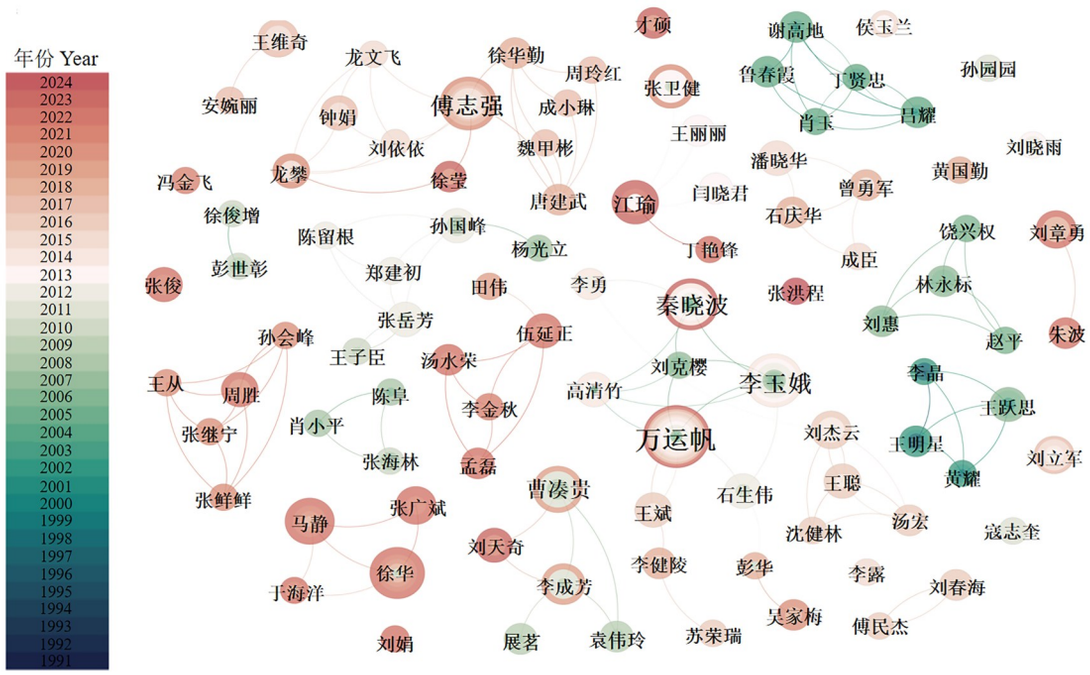
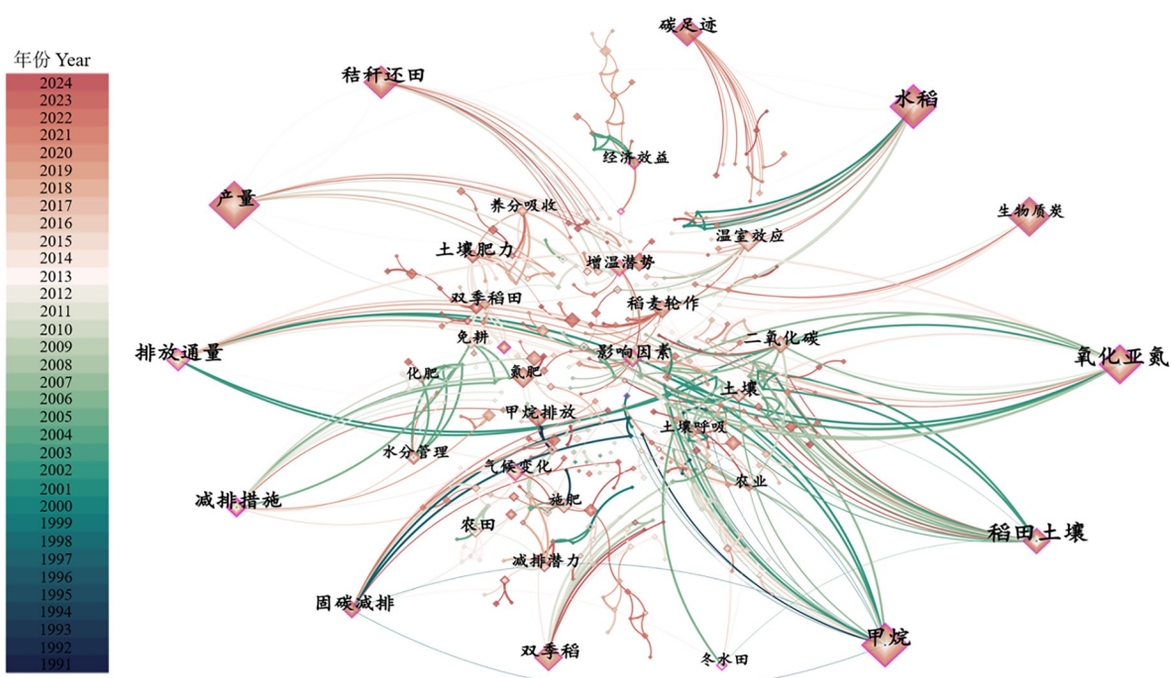



**图 3　我国稻田温室气体研究领域作者共现图谱(核心作者)**

Fig. 3　Co-occurrence map of authors on paddy greenhouse gas research in China (Core author)




节点大小代表关键词出现频次，节点越大，表示频次越高；节点中心颜色代表关键词首次出现年份；节点间的连线代表关键词的共现频次，连线越粗，表示二者关联度越高；连线颜色代表关键词首次发生共现的年份。

The size of each node represents the frequency of the keyword, the larger the node, the higher the frequency. The color at the node center indicates the year when the keyword first appeared. The links between nodes represent the co-occurrence frequency of keywords, the thicker the link, the higher the correlation between the two keywords. The color of each link represents the year when the two keywords first co-occurred.

**图 4　我国稻田温室气体研究领域关键词共现图谱**

Fig. 4　Co-occurrence map of keywords on paddy greenhouse gas research in China

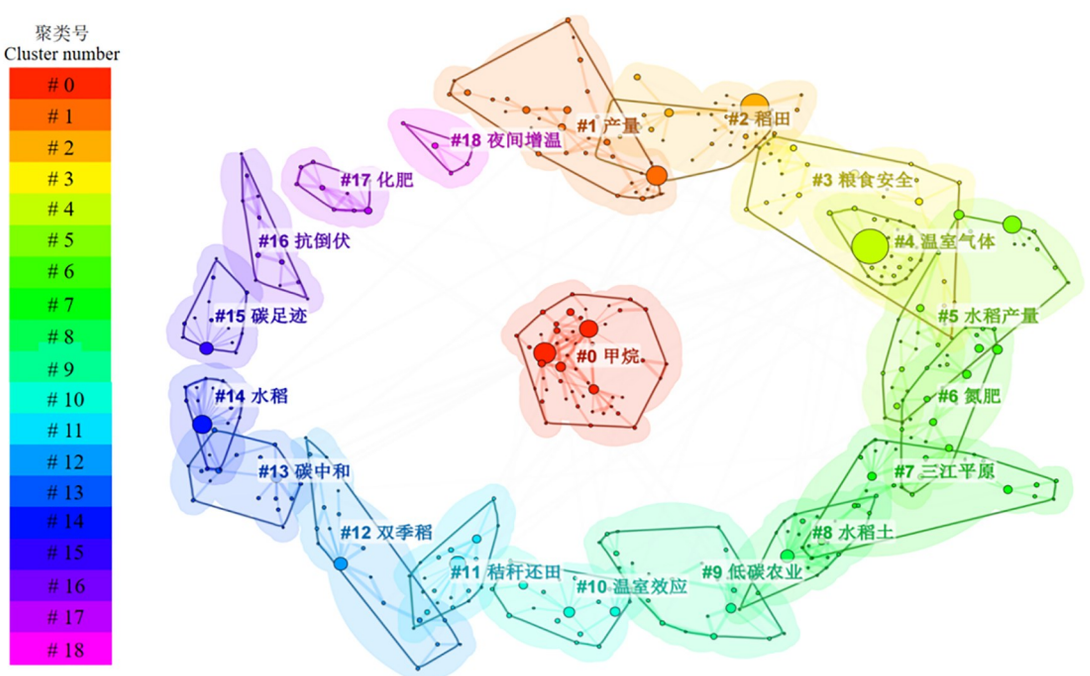
**表 3 我国稻田温室气体研究领域的高频次关键词和高中心性关键词(排名前 10)**

Table 3 High frequency keywords and high centrality keywords on paddy greenhouse gas research in China (Top 10)

| 排名 Rank | 高频次关键词 High frequency keywords | 频次 Frequency | 排名 Rank | 高中心性关键词 High centrality keywords | 中介中心性 Centrality |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 甲烷 | 157 | 1 | 减排措施 | 0.42 |
| 2 | 产量 | 142 | 2 | 氧化亚氮 | 0.29 |
| 3 | 水稻 | 124 | 3 | 排放通量 | 0.28 |
| 4 | 氧化亚氮 | 109 | 4 | 冬水田 | 0.25 |
| 5 | 生物质炭 | 98 | 5 | 水稻 | 0.23 |
| 6 | 秸秆还田 | 83 | 6 | 甲烷 | 0.22 |
| 7 | 碳足迹 | 58 | 7 | 产量 | 0.19 |
| 8 | 稻田土壤 | 55 | 8 | 稻田土壤 | 0.18 |
| 9 | 双季稻 | 55 | 9 | 秸秆还田 | 0.17 |
| 10 | 固碳减排 | 38 | 10 | 固碳减排 | 0.17 |

### 3.2 关键词聚类分析

关键词聚类网络图谱是将关键词按照其相似性和共现关系进行分类,从而展示研究领域中不同主题之间的关联和结构。本研究采用对数似然比(LLR)算法分析产生了 19 个关键词聚类(图 5),其模块值为 0.829 5,说明聚类结构显著,网络模块化程度较高;平均轮廓值为 0.965 5,说明聚类合理,该聚类是高效率且令人信服的。




图谱中不同颜色代表不同聚类,重叠部分表示关键词同属于多个聚类。聚类号与聚类规模成反比,即编号越小,关键词聚类规模越大。

Various colors across the visualization stand for separate clusters, overlaps mark keywords belonging to several clusters. Cluster numbers correlate negatively with cluster size, lower numbers represent bigger cluster size.

**图 5 我国稻田温室气体研究领域关键词聚类图谱**

Fig. 5 Keywords clustering map on paddy greenhouse gas research in China

由表 4 可知,“甲烷”这一类别是最大的聚类,包含的节点数量最多,是该领域的核心研究主题。国内研究在形成如“甲烷”“温室气体”“氮肥”“低碳农业”和“碳足迹”等主流方向的同时,也涌现出一

**表 4　我国稻田温室气体研究领域关键词聚类相关指标**

Table 4　Keywords clustering related indicators on paddy greenhouse gas research in China

| 聚类号 Cluster number | 聚类名称 Cluster name | 聚类大小 Cluster size | 轮廓值 Contour value | 聚类号 Cluster number | 聚类名称 Cluster name | 聚类大小 Cluster size | 轮廓值 Contour value |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| #0 | 甲烷 | 50 | 0.964 | #10 | 温室效应 | 21 | 0.915 |
| #1 | 产量 | 34 | 0.938 | #11 | 秸秆还田 | 21 | 0.980 |
| #2 | 稻田 | 30 | 0.976 | #12 | 双季稻 | 21 | 0.956 |
| #3 | 粮食安全 | 28 | 0.967 | #13 | 碳中和 | 17 | 0.948 |
| #4 | 温室气体 | 27 | 0.964 | #14 | 水稻 | 16 | 0.983 |
| #5 | 水稻产量 | 26 | 0.976 | #15 | 碳足迹 | 14 | 0.990 |
| #6 | 氮肥 | 26 | 0.959 | #16 | 抗倒伏 | 12 | 0.982 |
| #7 | 三江平原 | 26 | 0.974 | #17 | 化肥 | 10 | 0.995 |
| #8 | 水稻土 | 25 | 0.978 | #18 | 夜间增温 | 5 | 0.980 |
| #9 | 低碳农业 | 25 | 0.968 | | | | |

些细分研究类别。例如，“三江平原”反映了以该典型湿地区域为案例的集中研究；“抗倒伏”聚类则揭示了作物农艺性状与温室气体排放的交叉融合。这些聚类体现了国内研究在特定区域实践和学科交叉层面的细化探讨。

### 3.3　关键词时序分析

关键词时序图谱可以展示研究主题随时间演变的趋势。由图 6 可知，在起步探索阶段（1991—2004 年），我国开始关注稻田温室气体排放，重点围绕甲烷和氧化亚氮排放通量监测和增温潜势核算的研究，并开始探讨水肥管理对稻田土壤温室气体排放的影响；在快速发展阶段（2005—2019 年），受气候变化的影响，研究重点转向稻田温室气体排放对气候变化的响应，同时注重协调减排目标与产量

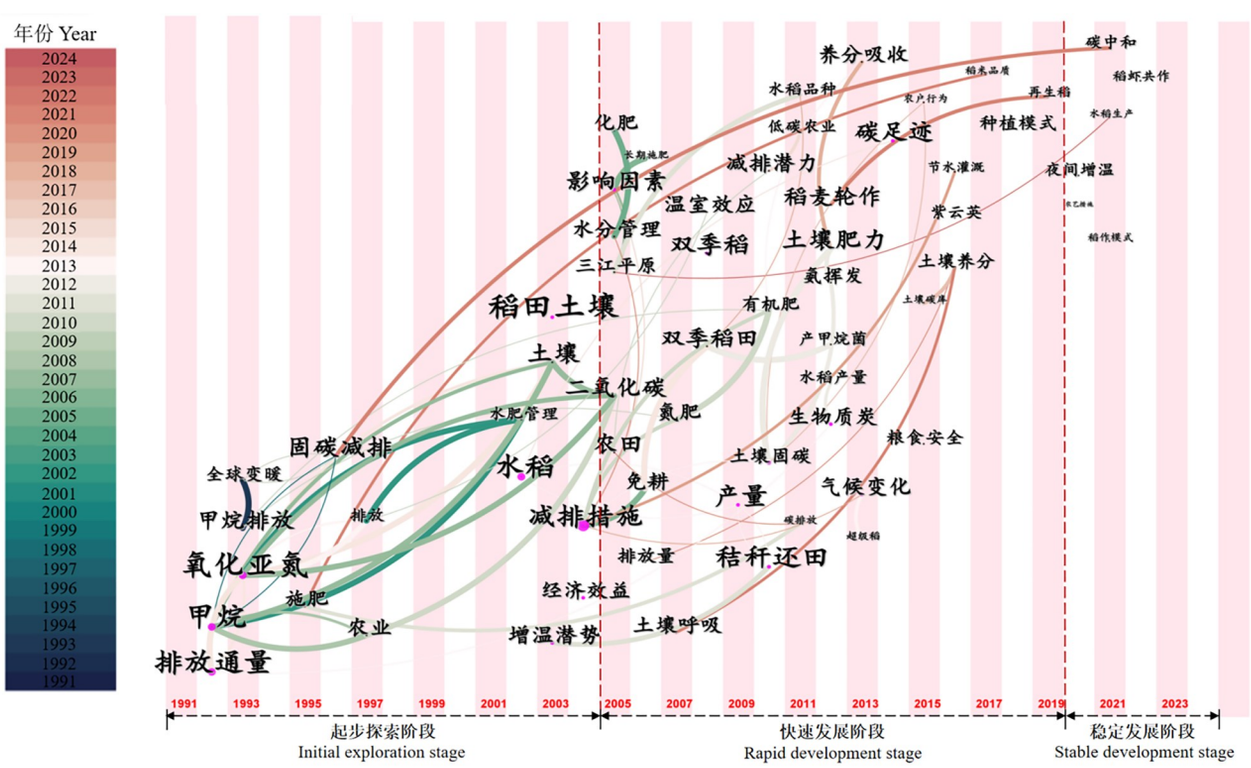



**图 6　我国稻田温室气体研究领域关键词时序图谱**

Fig. 6　Keywords time series map on paddy greenhouse gas research in China

变动的关系，探索通过种植绿肥、秸秆还田和轮作等种植方式来揭示稻田温室气体的排放规律，并在水分管理、施肥管理、水稻品种选育和施用生物质炭等方面提出并推广了一系列减排方法；在稳定发展阶段（2020—2024 年），全球变暖、夜间增温现象日益显著，与此同时我国正式提出“碳中和”目标，研究者们通过改良农艺措施来探讨其对温室气体排放的影响，并开始积极探索新技术，如发展稻虾共作等新型种养模式来挖掘新的减排途径。

### 3.4 关键词突现分析

关键词突现检测可以筛选出短期内出现频率显著增加的关键词，明确关键词突现起止时间，更快地发现新兴研究方向。本研究选取引用强度排名前 20 位的关键词，如表 5 所示。各关键词间的突现强度差异较大，“稻田”“碳足迹”和“再生稻”是突现强度最高的 3 个关键词，突现强度分别为 10.30、8.23 和 5.35，其中“碳足迹”和“再生稻”热点关键词于 2022 年首次突现，并延续至 2024 年。此外，自

**表 5 我国稻田温室气体研究领域关键词突现强度统计（排名前 20）**

Table 5 Statistics of keywords burst strength on paddy greenhouse gas research in China (Top 20)

| 排名 Rank | 关键词 Keyword | 出现年份 Year of appearance | 突现强度 Burst strength | 起始年份 Beginning year | 终止年份 Ending year | 1991—2024 年 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 甲烷 | 1992 | 4.08 | 1992 | 1999 | |
| 2 | 排放 | 1997 | 4.14 | 1997 | 2010 | |
| 3 | 稻田土壤 | 2003 | 4.33 | 2003 | 2009 | |
| 4 | 减排措施 | 2004 | 2.75 | 2004 | 2012 | |
| 5 | 影响因素 | 2005 | 4.45 | 2005 | 2008 | |
| 6 | 三江平原 | 2005 | 3.41 | 2005 | 2011 | |
| 7 | 稻田 | 1992 | 10.30 | 2006 | 2011 | |
| 8 | 长期施肥 | 2006 | 3.95 | 2006 | 2008 | |
| 9 | 温室效应 | 2008 | 4.58 | 2008 | 2015 | |
| 10 | 氧化亚氮 | 1993 | 3.79 | 2012 | 2014 | |
| 11 | 气候变化 | 2013 | 4.18 | 2013 | 2016 | |
| 12 | 紫云英 | 2016 | 3.97 | 2016 | 2018 | |
| 13 | 节水灌溉 | 2016 | 3.93 | 2016 | 2020 | |
| 14 | 氮肥 | 2007 | 3.72 | 2016 | 2017 | |
| 15 | 有机肥 | 2010 | 3.74 | 2018 | 2020 | |
| 16 | 经济效益 | 2004 | 3.20 | 2019 | 2020 | |
| 17 | 碳中和 | 2021 | 4.07 | 2021 | 2024 | |
| 18 | 碳足迹 | 2014 | 8.23 | 2022 | 2024 | |
| 19 | 再生稻 | 2019 | 5.35 | 2022 | 2024 | |
| 20 | 稻虾共作 | 2022 | 4.25 | 2022 | 2024 | |

注：突现强度反映关键词在特定时间段内出现频率的突发性增长幅度，强度值越大，表明该词在该时段内受到的关注度上升越快、研究热度越高。浅蓝色线条表示关键词在这一时段尚未出现；蓝色线条表示关键词在这一时段已经出现，但尚未达到突现状态；红色线条表示关键词在这一时段内处于突现状态。

Note: Burst strength reflects the magnitude of a sudden surge in the frequency of a keyword's appearance during a specific time period, the higher the strength value, the more significant the increase in research attention and the greater the research interest during that period. Light blue segments indicate that the keyword had not yet appeared during that period; blue segments indicate that the keyword had appeared but had not yet reached burst status; red segments indicate that the keyword was in a burst status during that period.

2020年后，“碳中和”和“稻虾共作”等关键词也开始突现，且一直是近几年学者们研究的热点。

将20个突现关键词进行归类，可以概括为排放特征、影响因素、减排措施、经济视角、生态政策这五大类。与排放特征相关的有：“甲烷”“排放”“稻田土壤”“三江平原”“稻田”“温室效应”“氧化亚氮”和“碳足迹”；与影响因素相关的有：“影响因素”“长期施肥”“气候变化”和“氮肥”；与减排措施相关的有：“减排措施”“紫云英”“节水灌溉”“有机肥”“再生稻”和“稻虾共作”；与经济视角相关的有：“经济效益”；与生态政策相关的有：“碳中和”。这5类关键词相互关联。

## 4　讨　论

### 4.1　中国稻田温室气体文献分布

从发文量时序变化来看，我国稻田温室气体研究在前期较为薄弱，中后期由于受到国内外形势和政策变化的影响实现了较快发展。20世纪末，在《联合国气候变化框架公约》[23]的谈判中，我国坚持“共同但有区别的责任”原则，主张发达国家应承担主要减排责任，并明确表示在达到中等发达国家水平之前，不会承担量化减排义务。在该阶段我国更加强调的是发展中国家权益，对温室气体减排持谨慎态度，因此关于稻田温室气体的研究相对迟缓。2007年，我国发布《应对气候变化国家方案》[24]，成为发展中国家中第一个制定全面应对气候变化国家方案的国家。2009年，我国在哥本哈根气候大会上承诺到2020年单位GDP二氧化碳排放比2005年下降40%～45%[25]，这一承诺标志着我国在国际气候治理中开始承担自主减排责任，此后一段时期内我国开始积极参与到温室气体减排的工作和研究中。2011年，“十二五”规划中首次提出碳强度（单位GDP碳排放）降低目标[26]，进一步强化了减排政策。2016年，中国批准《巴黎协定》，并积极参与全球气候治理[27]，推动多边和双边气候合作。在《巴黎协定》生效后，随着减排行动不断深化、低碳发展持续推进，我国稻田温室气体研究的发展最为迅速。2020年9月，习近平主席在第七十五届联合国大会一般性辩论上宣布，中国将力争2030年前实现碳达峰，2060年前实现碳中和[28]，“双碳”目标提出以来，我国积极引领全球气候行动。自20世纪末以来，中国在温室气体排放问题上的态度经历了“谨慎参与”—“灵活参与”—“积极参与”—“积极引领”的转变[29]。这一转变推动了我国稻田温室气体研究的发展，也反映出我国对气候变化认知的提升，凸显出我国参与全球气候治理的责任与担当。

结合机构共现图谱和合作作者共现图谱可见，各机构和作者合作联系较薄弱，图谱中存在较多孤立的节点或小型合作子群，表明国内稻田温室气体研究领域的研究力量较为分散，这可能源于学术交流平台或合作体系尚不健全。因此，后续研究应加强学术交流平台建设，如定期召开学术会议，分享各机构在稻田温室气体领域优秀的学术成果，也可以通过共享研究资源、联合申请项目来加强合作交流。从发文机构统计结果来看，排名前10位的研究机构以农业类高校和科研院所为主，说明其在稻田温室气体研究领域发挥了重要作用，这可能源于这类机构通常拥有深厚的专业基础和丰富的研究经验，在基础研究方面具有优势，通常能够获得农业领域的专项科研资金，这些都为其开展高质量研究提供了条件。

### 4.2　研究热点解析

基于关键词时序图谱（图6）和突现强度统计（表5），可将我国稻田温室气体研究的热点演变划分为与发文阶段（图1）相对应的3个时期。以下从排放特征、影响因素以及减排措施3个维度分别分析各阶段的研究重点。

#### 4.2.1　稻田温室气体排放特征研究趋势

起步探索阶段：该阶段关键词节点主要集中分布于图谱左侧，以“甲烷”（聚类#0）“排放通量”和“增温潜势”为核心。这表明早期研究主要聚焦于稻田$CH_4$排放基本特征的测定，如戴爱国等[30]对杭州地区秋季稻田$CH_4$排放的早期研究。

快速发展阶段：“氧化亚氮”节点在起步探索阶段已出现，但表5显示其在2012—2014年呈现突现状态。“二氧化碳”节点也在此阶段开始出现，并与“甲烷”“氧化亚氮”节点形成紧密连接，这标志着研究视角从单一$CH_4$排放分析拓展到多组分温室气体协同排放特征及全球增温潜势（GWP，指在一定时间跨度内，某种温室气体相对于$CO_2$所产生的累积辐射强迫）的综合评估。在一项针对轮作系统的研究中发现，小麦-水稻轮作系统的$CH_4$排放量和GWP最高，绿肥-水稻轮作次之，休闲-水稻轮作最

低；各模式间$N_2O$排放量和GWP无显著差异[31]。同时，“三江平原”（聚类#7）等区域关键词节点的出现，揭示了排放特征研究的空间异质性[32]。

稳定发展阶段：“碳足迹”（聚类#15）节点在快速发展阶段出现，但其在2022—2024年突现，突现强度达到8.23，这标志着研究视角从气体排放量转向全生命周期碳排放评价，与“碳中和”（聚类#13）国家战略形成直接呼应。

**4.2.2** *稻田温室气体排放影响因素研究趋势*

起步探索阶段：早期节点以“施肥”和“水肥管理”为主，反映早期研究主要关注农艺措施对$CH_4$排放的直接影响[33]。

快速发展阶段：“氮肥”（聚类#6）节点在该阶段出现，与表5中的“影响因素”（2005—2008年突现）、“长期施肥”（2006—2008年突现）等形成呼应。有研究发现，肥料类型和施肥量对温室气体排放影响显著，大量施用无机氮肥通常会增加$N_2O$排放[34-35]。“秸秆还田”（聚类#11）和“节水灌溉”节点反映出研究重心从单因素效应转向多因素互作与耦合调控研究。针对我国东北寒冷水稻区的研究发现，在秸秆还田条件下，控制灌溉可显著降低$CH_4$排放量，且不会造成$N_2O$排放量明显增加[36]。也有研究表明，与连续淹水相比，干湿交替灌溉的$CH_4$排放显著减少，但增加了$N_2O$排放水平[37-38]，间歇灌溉显著降低了GWP和温室气体强度（GHGI，指单位产量的温室气体排放量）[39]。同时，“气候变化”节点在2013年开始出现，并于2013—2016年形成突现，标志着外部环境驱动因子被纳入研究框架。研究发现，升高的$CO_2$浓度（$eCO_2$）通过增加叶片光合作用和水稻生长，进而增加为甲烷菌提供的有机底物（根系沉积物、根系分泌物和凋落物），导致甲烷菌数量增加，从而增加水稻田的$CH_4$排放。此外，气候变暖可以通过增加亚硝酸还原酶基因的丰度来增加$N_2O$排放量[6]。“水稻品种”节点的出现预示着高产低排品种的筛选成为研究方向之一，不同品种的水稻在根系分泌物、生长特性等方面存在差异，进而影响土壤微生物环境和温室气体排放。例如，一些高产水稻品种通过改变根系形态和分泌物，影响了$CH_4$和$N_2O$的排放通量[40]。

稳定发展阶段：“夜间增温”（聚类#18）作为气候变化的细化方向在图谱末端出现，印证了该方向的新兴性。

**4.2.3** *稻田温室气体减排措施研究趋势*

起步探索阶段：该阶段减排相关的关键词较少，仅有“减排措施”节点，与表5中的“减排措施”在2004—2012年的早期突现相对应。该阶段研究以定性探讨为主，具体技术路线尚不清晰。

快速发展阶段：图6显示，“节水灌溉”“紫云英”和“有机肥”等节点在该阶段集中涌现，与表5中“紫云英”（2016—2018年突现）和“有机肥”（2018—2020年突现）的突现期吻合。这表明研究已进入具体减排措施的效果验证阶段，形成了以水肥优化为核心的技术雏形。同时，“生物质炭”节点显著增大，反映出新型土壤改良剂成为研究热点。“再生稻”处于该阶段末端，与表5中高强度突现一致。“再生稻”通过减少翻耕与淹水时间实现$CH_4$减排23.2%[41]，较稻麦轮作相比，可降低全年$N_2O$排放量86.5%[42]，成为种植制度优化减排的典型案例。

稳定发展阶段：图6右侧末端，“稻虾共作”节点位置突出，以其为代表的稻渔综合种养模式不仅能增加农业收入，还能通过改变稻田生态环境减少温室气体排放，体现了“减排—增产—增收”多目标协同的新方向。一项针对水稻-动物共生（即稻鸭、稻鱼、稻虾、稻蟹、稻蛙系统）和水稻单作的对比分析表明，水稻-动物共养显著减少了86.8%的$CH_4$排放，提高了49.2%的水稻产量，对$N_2O$排放无显著影响，可将GWP降低12.9%，GHGI降低4.9%[43]。此外，“固碳减排”节点的持续存在，预示着研究正从“减排”向“增汇”拓展。

### 4.3 中国稻田温室气体研究的国际地位及特色

从国际发文情况来看，我国研究者在稻田温室气体领域成果产出丰富。本研究所引文献中，不少国内学者的研究成果发表于各类国际权威期刊，研究内容涵盖排放清单核算、机理机制、减排技术及政策评估等方面，这表明我国在该领域的研究已获得国际学界认可，并产生重要影响。

与国际同类研究相比，中国稻田温室气体研究呈现出以下鲜明特色：

1）紧密对接国家战略与政策需求。从早期对《联合国气候变化框架公约》的响应，到近年来对碳达峰、碳中和目标的快速跟进（如图1发文量阶段变化及“碳中和”突现词所示），中国研究始终与国家气候治理进程同频共振，具有强烈的政策导向性。

2）注重结合区域差异开展本土化实践。我国

幅员辽阔，稻作生态系统类型丰富，相关研究系统揭示了不同稻区温室气体排放的时空分布规律，围绕三江平原等典型区域开展了大量案例研究，积累了不同稻区的适配数据。

3）探索特色农作模式的减排潜力。以“再生稻”“稻虾共作”为代表的中国特色种植制度近年成为研究热点（表5），这些模式将粮食生产与生态效益相结合，为全球稻田低碳技术研发提供了新思路。

### 4.4　优势及局限性

从CNKI数据库下载的数据涵盖了中国稻田温室气体领域的绝大多数文章，数据分析相对客观且全面，有助于明确我国稻田温室气体研究的过去和现状，并预测未来的研究前沿。然而，本研究也存在一定局限性，如：1）关键词存在同义表述，导致不同聚类模块出现内容重叠；2）对主题词进行了限定，使得文献检索范围受限，在一定程度上缩减了文献样本量；3）仅选取CNKI数据库作为数据源，未整合其他中文数据库和国外英文文献。因此，本研究所梳理的研究热点与发展趋势仅反映国内研究现状，可能与国际前沿方向存在差异。上述不足也为后续进行中外文献对比研究指明了方向。

## 5　结论与展望

### 5.1　结论

本研究通过CiteSpace可视化与计量化软件对1991—2024年收录于CNKI数据库的1 149篇关于中国稻田温室气体研究的相关文献进行了分析，得出如下结论：

1）从发文时间和发文数量来看，成果产出具有阶段性特征，受到国内外形势和政策影响较大。总体可分为3个阶段：起步探索阶段（1991—2004年）、快速发展阶段（2005—2019年）、稳定发展阶段（2020—2024年）。

2）从发文机构和合作作者来看，当前稻田温室气体研究领域的发文机构和研究者较多，但机构间和作者间的合作较少，后期需加强多方合作交流。此外，研究机构多为农业类高校和涉农科研院所，其中南京农业大学在该领域较为活跃、影响较大，中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所的万运帆是发文量最多的作者。

3）结合关键词共现、聚类、时序、突现分析来看，我国稻田温室气体研究的内容始终与国家政策和行业发展密切相关，已形成从排放特征诊断、影响因素解析到减排措施研究的完整知识链条。在排放原因方面，研究揭示了水分管理、施肥管理（尤其是氮肥）、气候变化、水稻品种等关键因子的作用机制；在减排措施方面，研究呈现出清晰的阶段性演进：从早期水分管理、有机替代等技术，到近几年的再生稻、稻虾共作等与种植制度相结合的新型减排途径，并与碳中和、碳足迹等战略目标深度对接，成为当前的研究热点。

### 5.2　展望

本研究基于关键词突现分析（表5）所揭示的新兴热点（碳中和、碳足迹、再生稻、稻虾共作）以及当前“双碳”目标对农业绿色发展的迫切需求，从以下三方面提出未来研究方向：

1）新型种养模式的减排机制与效应评估。以“稻虾共作”为代表的稻渔综合种养模式是近年来稻田温室气体减排领域的重点研究方向。目前关于其减排效应的结论仍存在争议，微生物介导的碳氮循环、养殖生物对土壤氧化还原条件的影响以及不同养殖密度与管理的减排临界值等问题还需深入探讨。在后续的研究中，应强化田间定位观测与室内模拟实验的机理研究，综合评价该类模式在我国主要稻作区的减排能力与生产效益，为其科学推广提供依据。

2）稻田碳足迹核算方法的标准化与体系构建。近年来，“碳足迹”研究热度显著提升，说明该领域研究方向从关注单一气体排放开始转向全生命周期碳排放评价。由于现有研究对核算边界、功能单位、本地化排放因子的设定不尽统一，使得不同研究成果之间可比性较差。因此，亟须建立适用于我国稻田生产模式的碳足迹统一核算标准，推动碳足迹评价体系融入低碳稻作认证与农业碳交易机制。

3）区域差异化减排技术体系的构建与优化。受气候、土壤、种植方式的影响，我国不同稻区地域条件差异较大，单项减排技术难以在全国范围内普遍适用。今后的研究应结合我国不同稻区生态区划特征，整合水分、施肥、品种、种植制度等手段，因地制宜地构建差异化减排方案。

## 参考文献　References

[1]　杨新欢，汤剑平．全球变暖对2022年长江流域极端热浪影响的模拟研究[J].

南京大学学报:自然科学, 2025, 61(3): 475-488
Yang X H, Tang J P. Simulation of the extreme heat wave in the Yangtze River Basin in 2022 under global warming[J]. *Journal of Nanjing University: Natural Science*, 2025, 61(3): 475-488 (in Chinese)

[2] 王萌萌, 刘晓辉. 全球变暖、通货膨胀与货币政策[J]. 云南财经大学学报, 2025, 41(7): 59-76
Wang M M, Liu X H. Global warming, inflation and monetary policy[J]. *Journal of Yunnan University of Finance and Economics*, 2025, 41(7): 59-76 (in Chinese)

[3] 高嘉, 杨怀宇. 气候变暖对中国海水养殖业的影响研究: 基于1985—2019年我国沿海11个省(自治区、直辖市)的面板数据[J]. 海洋开发与管理, 2024, 41(9): 155-163
Gao J, Yang H Y. Study on the impact of climate warming on mariculture in China: Based on panel data from 11 coastal provinces from 1985-2019[J]. *Ocean Development and Management*, 2024, 41(9): 155-163 (in Chinese)

[4] 庞娇, 单婧, 闫愉悦, 苗梓晗, 田诗雨, 郭欣雨, 任涵淇, 吕天乐, 闫丰. 京津冀生态系统固碳效益时空格局及驱动因素定量分离[J]. 环境科学, 2025, 46(3): 1666-1678
Pang J, Shan J, Yan Y Y, Miao Z H, Tian S Y, Guo X Y, Ren H Q, Lv T L, Yan F. Quantitative separation of spatiotemporal patterns and driving factors of carbon sequestration benefits in the Beijing-Tianjin-Hebei Region [J]. *Environmental Science*, 2025, 46(3): 1666-1678 (in Chinese)

[5] Li L D, Awada T, Shi Y Y, Jin V L, Kaiser M. Global greenhouse gas emissions from agriculture: Pathways to sustainable reductions[J]. *Global Change Biology*, 2025, 31(1): e70015

[6] Qian H Y, Zhu X C, Huang S, Linquist B, Kuzyakov Y, Wassmann R, Minamikawa K, Martinez-Eixarch M, Yan X Y, Zhou F, Sander B O, Zhang W J, Shang Z Y, Zou J W, Zheng X H, Li G H, Liu Z H, Wang S H, Ding Y F, van Groenigen K J, Jiang Y. Greenhouse gas emissions and mitigation in rice agriculture[J]. *Nature Reviews Earth & Environment*, 2023, 4(10): 716-732

[7] Li S, Lu H W, Li X D, Shao Y N, Tang Y F, Chen G J, Chen Z, Zhu Z Q, Zhu J S, Tang L, Liang J. Toward low-carbon rice production in China: Historical changes, driving factors, and mitigation potential [J]. *Environmental Science & Technology*, 2024, 58(13):5772-5783

[8] Chen J X, Zhang J J, Fu S, Liang S, Wang K. Does the cropping system have a substantial influence on greenhouse gas emissions? Dynamics and key factors-based insights from an empirical study of China[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2025, 374:110805

[9] 陈宗良,高金和,袁怡,邵可声,张剑波,禹仲举,王步军. 不同农业管理方式对北京地区稻田甲烷排放的影响研究[J]. 环境科学研究, 1992, 5(4): 1-7
Chen Z L, Gao J H, Yuan Y, Shao K S, Zhang J B, Yu Z J, Wang B J. Study on the effects of different cultivation methods on the $CH_4$ emission from rice fields in Beijing[J]. *Research of Environmental Sciences*, 1992, 5(4): 1-7 (in Chinese)

[10] Liu B, Guo C Y, Xu J, Zhao Q Y, Chadwick D, Gao X P, Zhou F, Lakshmanan P, Wang X Z, Guan X L, Zhao H Y, Fang L F, Li S Y, Bai Z H, Ma L, Chen X J, Cui Z L, Shi X J, Zhang F S, Chen X P, Li Z L. Co-benefits for net carbon emissions and rice yields through improved management of organic nitrogen and water[J]. *Nature Food*, 2024, 5(3): 241-250

[11] Yang W, Zhou L N, Yao L, Nie J W, Jiang M D, Liu Z Y, Liu H, Zhu B, Wang B. Water management alleviates greenhouse gas emissions by promoting carbon and nitrogen mineralization after Chinese milk vetch incorporation in a paddy soil[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2025, 381: 109468

[12] Yao X C, Zhang Z Y, Li K X, Yuan F H, Xu X F, Long X Y, Song C C. Optimizing water and nitrogen management to balance greenhouse gas emissions and yield in Chinese rice paddies[J]. *Field Crops Research*, 2024, 319: 109621

[13] 李心雨, 邓姣, 朱杰, 李成伟, 蒋梦蝶, 刘章勇, 聂江文, 朱波. 秸秆还田和种植制度对长江中游稻田温室气体排放的影响[J]. 农业环境科学学报, 2024, 43(8): 1915-1927
Li X Y, Deng J, Zhu J, Li C W, Jiang M D, Liu Z Y, Nie J W, Zhu B. Interaction effects of straw returning and cropping systems on greenhouse gas emissions in rice fields in the middle reaches of the Yangtze River[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2024, 43(8): 1915-1927 (in Chinese)

[14] Peng L G, Deng S C, Yi W T, Wu Y Z, Cui B L, Zhang Y Y, Yao X B, Zhang X C, Yang H, Tang X R. Modulation of greenhouse gas emissions and soil organic carbon in rice paddies through various crop rotation systems combined with water-saving irrigation: Insights into soil bacterial composition and functional alterations[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2025, 394: 109897

[15] Xu X B, Zhao Q R, Guo J B, Li C, Li J, Niu K Y, Jin S Q, Fu C, Gaffney P P J, Xu Y, Sun M X, Xue Y H, Chang D H, Zhang Y M, Si W, Fan S G, Zhang L X. Inequality in agricultural greenhouse gas emissions intensity has risen in rural China from 1993 to 2020[J]. *Nature Food*, 2024, 5(11): 916-928

[16] Sheng S Y, Li F X, Yang B H, Luo T Y. The impact of cropland displacement on crop production greenhouse gas emissions: Evidence from China[J]. *Journal of Environmental Management*, 2025, 393: 127111

[17] 邵贞茱, 王斌, 冯建骋, 高强, 王寅, 侯文峰. 秸秆还田对东北黑土区稻田温室气体排放特征和水稻产量形成的影响[J]. 山东农业大学学报: 自然科学版, 2025, 56(4): 690-700
Shao Z Z, Wang B, Feng J C, Gao Q, Wang Y, Hou W F. Straw returning on greenhouse gas emission characteristics and rice yield formation in paddy fields in black soil region of Northeast China[J]. *Journal of Shandong Agricultural University: Natural Science Edition*, 2025, 56(4): 690-700 (in Chinese)

[18] 夏唯一, 樊畅, 张戈丽. 基于优化IPCC方法的中国稻田甲烷排放量估算[J]. 生态学报, 2024, 44(21): 9826-9835
Xia W Y, Fan C, Zhang G L. Estimation of methane emission from typical rice areas in China based on optimized IPCC method[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2024, 44(21): 9826-9835 (in Chinese)

[19] 包恒鑫, 张弥, 谢燕红, 贾磊, 葛培, 邱吉丽, 何洋, 张圳, 肖薇, 刘寿东. 高塔涡度相关观测长三角农业区$CO_2$通量变化特征及影响因素[J]. 生态学报, 2024, 44(17): 7552-7568
Bao H X, Zhang M, Xie Y H, Jia L, Ge P, Qiu J L, He Y, Zhang Z, Xiao W, Liu S D. Dynamics and environmental controls of $CO_2$ flux with tall-tower eddy covariance in heterogeneous agricultural landscape of Yangtze River Delta[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2024, 44(17): 7552-7568 (in Chinese)

[20] 刘天奇, 胡权义, 汤计超, 李成芳, 江洋, 刘娟, 曹凑贵. 长江中下游水稻生产固碳减排关键影响因素及技术体系[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2022, 30(4): 603-615
Liu T Q, Hu Q Y, Tang J C, Li C F, Jiang Y, Liu J, Cao C G. Key influencing factors and technical system of carbon sequestration and emission

reduction in rice production in the middle and lower reaches of the Yangtze River[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2022, 30(4): 603-615 (in Chinese)

[21] 孟轶, 廖萍, 魏海燕, 高辉, 戴其根, 张洪程. 施石膏对水稻产量和甲烷排放影响的荟萃分析[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2023, 31(2): 280-289
Meng Y, Liao P, Wei H Y, Gao H, Dai Q G, Zhang H C. Effects of gypsum application on grain yield and methane emissions in rice paddies: A global meta-analysis[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2023, 31(2): 280-289 (in Chinese)

[22] 吴美康, 王梓琳, 武高嫄, 魏晓双, 田平, 杨美英, 武志海. 秸秆还田下稻田温室气体减排调控机制研究[J]. 吉林农业大学学报, 2025, 47(3): 379-391
Wu M K, Wang Z L, Wu G Y, Wei X S, Tian P, Yang M Y, Wu Z H. Regulatory mechanism of greenhouse gas emission reduction in paddy fields under straw return[J]. *Journal of Jilin Agricultural University*, 2025, 47(3): 379-391 (in Chinese)

[23] 陈敏鹏.《联合国气候变化框架公约》适应谈判历程回顾与展望[J]. 气候变化研究进展, 2020, 16(1): 105-116
Chen M P. Progress and outlook of adaptation negotiation under the *United Nations Framework Convention on Climate Change*[J]. *Climate Change Research*, 2020, 16(1): 105-116 (in Chinese)

[24] 战雪雷.《中国应对气候变化国家方案》今起实施[N]. 中国财经报, 2007-06-05(1)
Zhan X L. *China's National Plan on Climate Change* comes into effect today[N]. *China Financial and Economic News*, 2007-06-05(1) (in Chinese)

[25] 钱炜. 中国减排为自愿自主行动[N]. 科技日报, 2009-11-27(3)
Qian W. China undertakes emission reduction efforts on a voluntary and autonomous basis[N]. *Science and Technology Daily*, 2009-11-27(3) (in Chinese)

[26] 国务院. 国务院关于印发"十二五"控制温室气体排放工作方案的通知[EB/OL]. [2025-12-01]. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2012-01/13/content_1294.htm
State Council. Notice of the State Council on issuing the work plan for controlling greenhouse gas emissions during the "Twelfth Five-Year Plan" Period[EB/OL]. [2025-12-01]. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2012-01/13/content_1294.htm (in Chinese)

[27] 董驰, 刘小雅, 李牡丹, 邵鑫桐.《巴黎协定》对我国低碳经济转型的影响研究[J]. 统计与管理, 2025, 40(6): 53-62
Dong C, Liu X Y, Li M D, Shao X T. Research on the impact of the *Paris Agreement* on China's low-carbon economic transformation[J]. *Statistics and Management*, 2025, 40(6): 53-62 (in Chinese)

[28] 习近平. 在第七十五届联合国大会一般性辩论上的讲话[N]. 人民日报, 2020-09-23(3)
Xi J P. Address at the General Debate of the Seventy-Fifth Session of the United Nations General Assembly[N]. *People's Daily*, 2020-09-23(3) (in Chinese)

[29] 陈敏鹏, 文皓薇. 全球多边环境治理中"共同但有区别责任"原则的演变逻辑及趋势:以《联合国气候变化框架公约》和《生物多样性公约》为例[J]. 生态学报, 2025, 45(16): 8253-8265
Chen M P, Wen H W. Evolution and trends of "Common but Differentiated Responsibilities" in global multilateral environmental governance: Case studies of the *United Nations Framework Convention on Climate Change* and *Convention on Biological Diversity*[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2025, 45(16): 8253-8265 (in Chinese)

[30] 戴爱国, 王明星, 沈壬兴, Schütz H, Seiler W, Rennenberg H, 吴海宝. 我国杭州地区秋季稻田的甲烷排放[J]. 大气科学, 1991, 15(1): 102-110
Dai A G, Wang M X, Shen R X, Schütz H, Seiler W, Rennenberg H, Wu H B. Methane emission from a rice paddy in Hangzhou of China during growing season of late rice[J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 1991, 15(1): 102-110 (in Chinese)

[31] Hu A Y, Sun X, Liu Q. Effects of different rotation systems on greenhouse gas ($CH_4$ and $N_2O$) emissions in the Taihu Lake region, China[J]. *The Journal of Applied Ecology*, 2016, 27(1): 99-106

[32] 张远, 李颖, 王毅勇, 宋书艺, 李长生. 三江平原稻田甲烷排放的模拟与估算[J]. 农业工程学报, 2011, 27(8): 293-298
Zhang Y, Li Y, Wang Y Y, Song S Y, Li C S. Simulation and estimation of methane emissions from rice paddies in Sanjiang Plain of the Northeast China[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2011, 27(8): 293-298 (in Chinese)

[33] 陶战, 杜道灯, 周毅, 买光熙, 刘箫威. 不同农作措施对稻田甲烷排放通量的影响[J]. 农业环境保护, 1995, 14(3): 101-104
Tao Z, Du D D, Zhou Y, Mai G X, Liu X W. Effect of different farming measures on the methane emission fluxes (MEF) from paddy soils[J]. *Agro-Environmental Protection*, 1995, 14(3): 101-104 (in Chinese)

[34] 薛建福, 濮超, 张冉, 赵鑫, 刘胜利, 陈阜, 张海林. 农作措施对中国稻田氧化亚氮排放影响的研究进展[J]. 农业工程学报, 2015, 31(11): 1-9
Xue J F, Pu C, Zhang R, Zhao X, Liu S L, Chen F, Zhang H L. Review on management-induced nitrous oxide emissions from paddy ecosystems[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2015, 31(11): 1-9 (in Chinese)

[35] Hou D M, Meng X C, Qin M T, Zheng E N, Chen P, Meng F X, Zhang C. Nitrous oxide ($N_2O$) emission characteristics of farmland (rice, wheat, and maize) based on different fertilization strategies[J]. *PLoS One*, 2024, 19(7): e0305385

[36] Xu D, Zhang Z X, Nie T Z, Lin Y Y, Li T C. Simulation study of $CH_4$ and $N_2O$ emission fluxes from rice fields in Northeast China under different straw-returning and irrigation methods based on the DNDC model[J]. *Water*, 2023, 15(14): 2633

[37] Xu Y, Ge J Z, Tian S Y, Li S Y, Nguy-Robertson A L, Zhan M, Cao C G. Effects of water-saving irrigation practices and drought resistant rice variety on greenhouse gas emissions from a no-till paddy in the central lowlands of China[J]. *Science of the Total Environment*, 2015, 505: 1043-1052

[38] Zhao C X, Qiu R J, Zhang T, Luo Y F, Agathokleous E. Effects of alternate wetting and drying irrigation on methane and nitrous oxide emissions from rice fields: A meta-analysis[J]. *Global Change Biology*, 2024, 30(12): e17581

[39] Feng Z Y, Qin T, Du X Z, Sheng F, Li C F. Effects of irrigation regime and rice variety on greenhouse gas emissions and grain yields from paddy fields in Central China[J]. *Agricultural Water Management*, 2021, 250: 106830

[40] Wang Z H, Wang L H, Liang H, Peng T, Xia G P, Zhang J, Zhao Q Z. Methane and nitrous oxide emission characteristics of high-yielding rice field[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2021, 28(12): 15021-15031

[41] Yu H Y, Zhu R, Zhang X C, Meng X T, Kong C, Zhang G B, Liu X H, Li Y Y, Yu Y X, Yao H Y. Responses of yield, $CH_4$ and $N_2O$ emissions to ratoon rice cropping and different management practices[J]. *Field Crops Research*, 2024, 319: 109622

[42] 王天宇，樊迪，宋开付，张广斌，徐华，马静. 巢湖圩区再生稻田甲烷及氧化亚氮的排放规律研究[J]. 农业环境科学学报，2021，40(8)：1829-1838
Wang T Y，Fan D，Song K F，Zhang G B，Xu H，Ma J. Reduced methane and nitrous oxide emissions from ratoon rice paddy in Chaohu polder area，China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*，2021，40(8)：1829-1838 (in Chinese)

[43] Wang C，Shi X Y，Qi Z M，Xiao Y Q，Zhao J，Peng S，Chu Q Q. How does rice-animal co-culture system affect rice yield and greenhouse gas? A meta-analysis[J]. *Plant and Soil*，2023，493(1)：325-340

责任编辑：申青苗



**第一作者简介：**钱晨晨，江西农业大学农学院农业生态学专业博士研究生。参与国家重点研发计划课题“长江中游双季稻三熟区资源优化配置机理与高效种植模式”、国家自然科学基金项目“秸秆还田条件下紫云英施氮对土壤有机碳和温室气体排放的影响”、广西重点研发计划项目“基于固碳减排的糖料蔗区水肥协同与灌溉制度优化技术研究与应用”等研究课题。在《中国生态农业学报》《大气与环境光学学报》《农学学报》等期刊上发表论文数篇。获得2024—2025年度学业奖学金。



**通讯作者简介：**黄国勤，中共党员，农学博士后。现任江西农业大学生态科学研究中心主任(所长)、二级教授、博士生导师，生态学学科带头人。主要从事耕作制度、农业生态、农业可持续发展等方面的教学和科研工作。主持和参加完成国家级、省级及其他各级各类科研项目(课题、专题)90余项，通过专家鉴定成果达到国际先进水平或国内领先水平。出版著作86种，在国内外学术期刊和学术会议上以中英文发表论文600余篇，获得教学成果奖、科技成果奖、优秀教材(或著作、论文)奖和个人荣誉奖等共计100余项(次)。1997年享受国务院颁发的政府特殊津贴。