

# 基于文献计量学的近红外光谱技术在中药质量控制领域的研究热点与趋势分析

李国沼<sup>1,2</sup>, 陈莘雨<sup>2</sup>, 高建平<sup>3</sup>, 杜晨晖<sup>4</sup>, 孙丹丹<sup>2,5\*</sup>

1. 山东中医药大学 药物研究院, 山东 济南 250355

2. 山东省中医药研究院, 山东 济南 250014

3. 山西医科大学 药学院, 山西 太原 030001

4. 山西中医药大学 中药与食品工程学院, 山西 晋中 030619

5. 国家中医药管理局中药分析学高水平重点学科, 山东 济南 250014

**摘要:** **目的** 基于文献计量学方法分析近红外光谱 (NIRS) 在中药质量控制领域的研究现状, 把握 NIRS 技术未来研究方向和发展趋势, 为其深入应用提供参考。**方法** 检索中国学术期刊全文数据库 (CNKI)、万方数据知识服务平台 (Wanfang)、维普数据库 (VIP)、Web of Science Core Collection (WOSCC)、PubMed 数据库中收录的 2000 年 1 月 1 日—2024 年 12 月 31 日有关 NIRS 技术在中药质量控制中的相关文献, 利用 VOSviewer1.6.20 和 CiteSpace6.3.R1 软件对年发文量、国家、机构、作者、关键词等方面进行可视化分析。**结果** 最终纳入 1 161 篇中文文献和 251 篇英文文献, 年发文量呈现出波动上升的趋势。发文量最多的 3 个国家分别是中国、美国和澳大利亚, 中国是主要的研究力量。北京中医药大学和浙江大学分别是中、英文文献发文量最多的机构。乔延江、Li Wenlong 分别为中、英文发文量最多的核心作者。研究热点聚焦于中药的定性和定量分析、生产过程的在线监测以及化学计量学模型的开发与优化等方面。突现分析显示, 利用机器学习以及多技术联用方法对产地溯源、中药制造等领域进行中药质量评价可能是未来的发展趋势。**结论** NIRS 技术在中药质量控制中应用广泛, 但需加强中药制剂质量控制及研究成果转化。未来应优化算法, 推动跨学科融合, 构建智能检测体系。

**关键词:** 近红外光谱; 中药; 质量控制; 文献计量学; 发展趋势

中图分类号: R284.1 文献标志码: A 文章编号: 1674-6376(2025)08-2327-12

DOI: 10.7501/j.issn.1674-6376.2025.08.025

## Research hotspots and trend analysis of near-infrared spectroscopy in quality control of traditional Chinese medicine based on bibliometrics

LI Guozhao<sup>1,2</sup>, CHEN Xinyu<sup>2</sup>, GAO Jianping<sup>3</sup>, DU Chenhui<sup>4</sup>, SUN Dandan<sup>2,5</sup>

1. Institute of Pharmacy, Shandong University of Traditional Chinese Medicine, Jinan 250355, China

2. Shandong Academy of Chinese Medicine, Jinan 250014, China

3. School of Pharmaceutical Sciences, Shanxi Medical University, Taiyuan 030001, China

4. College of Traditional Chinese Medicine and Food Engineering, Shanxi University of Chinese Medicine, Jinzhong 030619, China

5. Traditional Chinese Medicine Analysis of Key Disciplines of State Administration of TCM, Jinan 250014, China

**Abstract: Objective** To analyze the research status, future directions and development trends in the application of near-infrared spectroscopy (NIRS) for quality control of traditional Chinese medicine (TCM) through bibliometric analysis, and to provide reference for its further development. **Methods** Databases such as CNKI, Wanfang, VIP, Web of Science Core Collection (WoSCC), and PubMed were searched to collect relevant literature on this topic from 2000 to 2024. The annual publication volume was statistically analyzed based on the final included studies. Bibliometric tools VOSviewer 1.6.20 and CiteSpace 6.3.R1 were employed for visualization analysis of countries, institutions, authors, and keywords. **Results** A total of 1 161 Chinese literatures and 251 English literatures were included in this study. Annual publications demonstrated a fluctuating upward trend. The top three countries in terms

收稿日期: 2025-03-05

基金项目: 山东省技术创新引导计划 (中央引导地方科技发展资金) 项目 (YDZX2023027)

作者简介: 李国沼 (2000—), 男, 硕士研究生, 研究方向为中药制剂研究与产品开发。E-mail: 19932371189@163.com

\*通信作者: 孙丹丹, 女, 副研究员, 硕士生导师, 研究方向为中药质量标准与药效物质基础。E-mail: sundandan1005@163.com

of publication output were China, the United States, and Australia, with China being the dominant contributor. Beijing University of Chinese Medicine and Zhejiang University were the most productive institutions in Chinese and English literature, respectively. Qiao Yanjiang and Li Wenlong emerged as the core authors with the highest publication counts in Chinese and English literatures. Research hotspots focused on the qualitative and quantitative analysis of TCM, on-line monitoring of the production process, and the development and optimization of chemometric models. Burst analysis showed that the use of machine learning and multi-technology integration methods for the quality evaluation of TCM in fields such as origin traceability and TCM manufacturing may be the future development trend. **Conclusion** NIRS is widely applied in the quality control of traditional Chinese medicine, but it is necessary to enhance the quality control of traditional Chinese medicine preparations and the transformation of research results. In the future, algorithms should be optimized, interdisciplinary integration promoted, and an intelligent detection system constructed.

**Key words:** near-infrared spectroscopy; traditional Chinese medicine; quality control; bibliometrics; developing trend

近红外光谱 (NIRS) 是波长 750~2 500 nm 的振动光谱, 其波段位处于可见光与中红外光之间。20 世纪 80 年代后期, 随着计算机技术及相关分析方法迭代升级, NIRS 技术得到了更快的推广, 并逐渐发展成为一种独立的分析技术体系<sup>[1]</sup>。中药因其化学成分的复杂性, 传统质量控制方法往往面临操作繁琐, 耗时长等挑战。而 NIRS 技术凭借无须样品前处理、检测快速、无损分析等特点, 为中药质控提供了新的解决方案, 已广泛应用于中药定性鉴别和定量分析及生产过程的在线监测<sup>[2-4]</sup>。值得注意的是, NIRS 区存在吸收强度弱、谱带复杂、重叠严重以及信号不连续性等缺点, 导致经典定性定量方法难以有效实行<sup>[5]</sup>, 因此采用恰当的数据处理方法尤为重要。化学计量学融合了如数学、统计学、计算机科学等多学科理论, 通过优化化学量测过程, 可从复杂光谱数据中获得关键化学信息<sup>[6]</sup>。依托于化学计量学强大的数据建模和解析能力, NIRS 技术在中药定性鉴别、定量分析、过程监控等方面已取得显著性进展。

文献计量学于 1969 年被首次提出, 是一种对特定领域和期刊的科学出版物进行统计和定量分析的方法, 通过与数据可视化相结合, 能够清晰地描绘知识结构, 展示最新发展并预测特定领域的趋势<sup>[7]</sup>。CiteSpace 是一款基于 Java 语言的可视化计量软件, 可直观地呈现研究领域的发展规律、热点趋势以及前沿动态<sup>[8]</sup>; 莱顿大学科学技术研究中心创建的 VOSviewer 能够更清晰地显示研究领域作者、机构以及关键词间的相互关系及其强度<sup>[9]</sup>。本研究借助 CiteSpace 和 VOSviewer 软件对近年来 NIRS 技术应用于中药质量控制研究的中、英文文献进行文献计量学分析, 绘制可视化图谱, 直观地探究该领域的研究热点, 同时预测 NIRS 技术在中药质量控制领域的发展趋势, 为后续 NIRS 技术在

该领域的发展提供参考。

## 1 资料与方法

### 1.1 数据来源与检索策略

中文文献来源于中国学术期刊全文数据库 (CNKI)、万方数据知识服务平台 (Wanfang)、维普数据库 (VIP), 以“近红外光谱”与“中药”“中药材”“中药复方”“中药制剂”“中医药”和“中药饮片”等主题词的结合为检索词, 英文文献来源于 Web of Science Core Collection (WOSCC) 以及 PubMed 数据库, 以“near-infrared spectroscopy”“NIRS”与“traditional Chinese medicine”“Chinese materia medica”“Chinese herbal medicine”和“TCM”等主题词的结合为检索词。所有文献发表时间范围为 2000 年 1 月 1 日—2024 年 12 月 31 日。

### 1.2 纳入标准

研究内容为 NIRS 用于中药质量控制领域有关的文章, 其中中文文献包括期刊论文和硕博学位论文, 英文为“article”和“review”文献。

### 1.3 排除标准

与本研究无关的用于临床治疗、诊断等主题的文献; 会议通知、征稿、公告、专利和标准等类型的文献; 文献标题、作者、关键词和期刊等字段缺失的文献; 重复发表以及撤稿的文献。

### 1.4 数据处理

中文数据库以 Note Express 格式导出, 对于 WOS 数据库, 采用纯文本格式导出, 而 PubMed 数据库直接以 PubMed 格式导出。文献全部导入 Note Express 进行除重后, 由 2 位作者按照纳入排除标准进行文献筛选, 有争议时请通信作者评判。最终纳入的中、英文文献分别以 refworks-CiteSpace 和 Web of Science 格式导出为 txt 文件, 利用 CiteSpace 6.3.R1 软件进行数据转换<sup>[10]</sup>。将中、英文文献年度发文量数据导入 WPS 中, 制作年度发文量图。利用

VOSviewer 对中、英文文献数据进行国家、机构、作者的协作网络分析以及关键词共现网络分析，并绘制网络图谱。采用 CiteSpace 软件分别进行关键词聚类分析 (CA) 和突现分析，具体参数设置如下：时间范围设置为 2000—2024 年，时间切片设定为 1 年，数据裁剪方式为“Pathfinder”和“Pruning sliced networks”，其他参数为默认选项。对转化后的数据进行文献计量和可视化分析。

## 2 结果

### 2.1 发文趋势

本研究共检索到 2 793 篇文献，经过查重以及根据纳入排除标准进行筛选，最终纳入 1 161 篇中文文献，251 篇英文文献。2000 年 1 月 1 日—2024 年 12 月 31 日，中、英文文献总体均呈波动上升趋势。2000—2003 年中文文献呈缓慢增长趋势，年发文量不足 20 篇；2004—2017 年呈现迅速增长趋势，年发文量从 19 篇增长至 83 篇，并于 2017 年年发文量达到最高 (83 篇)；2018—2023 年进入平稳期，年发

文量呈上下波动趋势，年平均发文量为 60 篇。英文文献在该领域的发表数量相对有限，且其相关研究的首次出现时间为 2007 年，相较于中文文献而言，起步较晚。2007—2015 年该领域研究英文文献开始起步，年发文量不足 10 篇；2016—2024 年年发文量明显增多，保持在 10 篇以上，到 2024 年年发文量达到最高 (41 篇)，首次超过中文文献年发文量 (30 篇)。由以上数据可知，NIRS 技术在中药质量控制领域的研究在过去 20 多年间持续发展，虽然年发文量有波动，但整体呈现增长态势。结果见图 1。

### 2.2 国家分析

使用 VOSviewer 对英文文献中作者所属国家进行可视化分析，共得到 12 个节点和 12 条连线 (图 2)。251 篇英文文献中共有 12 个国家进行了 NIRS 技术在中药质量控制领域的相关研究。发文量最高的前 3 个国家分别是中国、美国和澳大利亚 (表 1)。中国 (249 篇) 是该领域发文量最高的国家，其次分别是美国 (6 篇)、澳大利亚 (4 篇)，由此可推测

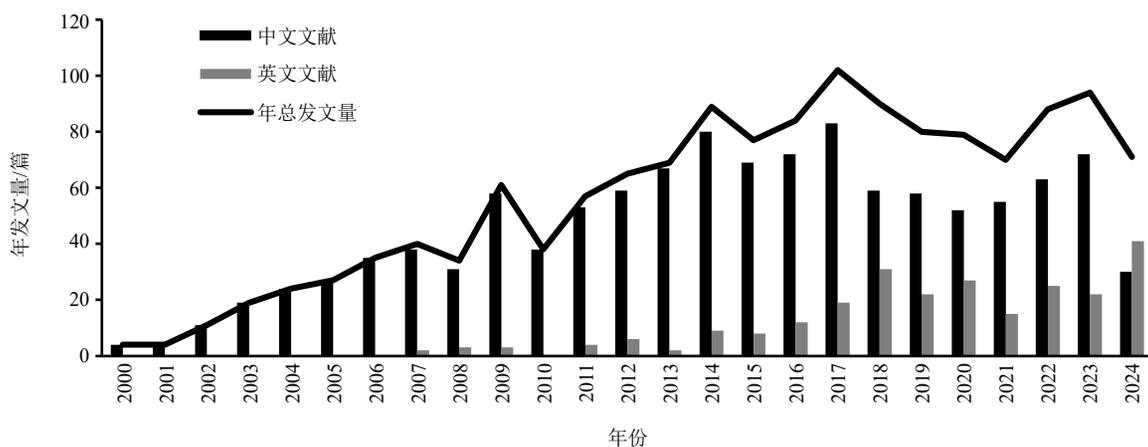


图 1 中、英文文献年发文量与发文趋势

Fig. 1 Annual publication volume and trend of Chinese and English literature

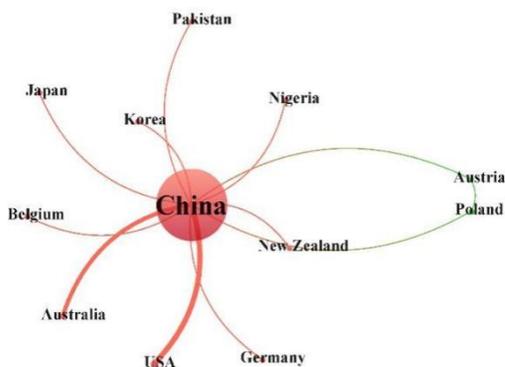


图 2 发文国家合作网络

Fig. 2 Publishing country cooperation network

表 1 英文文献前 3 发文国家

Table 1 Top three countries in English literature

| 序号 | 国家   | 发文量/篇 | 被引次数  | 每篇文献平均被引次数 |
|----|------|-------|-------|------------|
| 1  | 中国   | 249   | 2 108 | 8.47       |
| 2  | 美国   | 6     | 14    | 2.33       |
| 3  | 澳大利亚 | 4     | 104   | 26.00      |

中国学者对该领域予以了较多关注。其中，澳大利亚学者 Kokot Serge 与中国南昌大学倪永年团队在科研领域展开了深度合作，共同采用先进的 NIRS 技术对桂皮掺假的定性分类<sup>[11]</sup>、天葵子掺假的定量分析<sup>[12]</sup>、

牡丹产地定性鉴定<sup>[13]</sup>等多种中药材的质量控制上做出了突出贡献。尽管澳大利亚的总发文量并不突出，但其较高的平均被引次数（26 次）彰显了该国学者所发表文献的学术影响力，具有一定的参考价值。

### 2.3 机构合作分析

利用 VOSviewer 软件对中、英文文献发文机构分别进行共现分析，其机构发文量最小值分别设定为 5 和 4，如图 3 可知，中、英文文献分别涉及到 40 和 34 个机构。北京中医药大学和浙江大学分别为中、英文文献发文量最多的机构。中文文献发文

机构中北京中医药大学、浙江大学、中国中医科学院之间有密切的合作关系，形成了该研究领域的核心团队。天津中医药大学与天津天士力集团有限公司开展校企合作，体现了产学研结合的模式，有利于科研成果转化。英文文献发文量前 3 的机构包括浙江大学（44 篇）、北京中医药大学（30 篇）、广东药科大学（17 篇），发文数量排名前 10 的机构（表 2）均来自中国，表明中国高校在该领域的英文文献发表中占据主导地位，为推动该领域研究的国际化进程奠定了坚实基础。

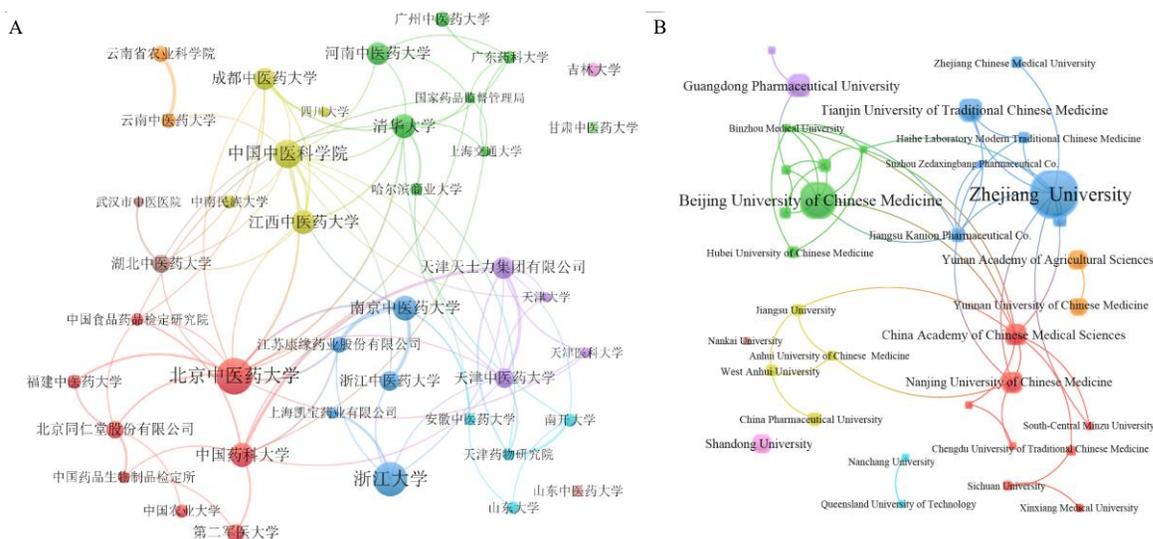


图 3 中文 (A) 与英文 (B) 文献发文机构合作网络

Fig. 3 Collaboration network of institution in Chinese (A) and English (B) literature

表 2 中、英文文献发文量前 10 的机构

Table 2 Top 10 institutions by publication volume in Chinese and English literature

| 序号 | 中文文献发文机构    | 发文量/篇 | 序号 | 英文文献发文机构   | 发文量/篇 |
|----|-------------|-------|----|--|-------|
| 1  | 北京中医药大学     | 58    | 1  | Zhejiang University                                | 44    |
| 2  | 浙江大学        | 52    | 2  | Beijing University of Chinese Medicine             | 30    |
| 3  | 中国中医科学院     | 36    | 3  | Guangdong Pharmaceutical University                | 17    |
| 4  | 南京中医药大学     | 27    | 4  | Tianjin University of Traditional Chinese Medicine | 17    |
| 5  | 江西中医药大学     | 26    | 5  | China Academy of Chinese Medical Sciences          | 15    |
| 6  | 中国药科大学      | 25    | 6  | Nanjing University of Chinese Medicine             | 14    |
| 7  | 清华大学        | 25    | 7  | Shandong University                                | 12    |
| 8  | 河南中医药大学     | 22    | 8  | Yunnan Academy of Agricultural Sciences            | 12    |
| 9  | 天津天士力集团有限公司 | 21    | 9  | Yunnan University of Chinese Medicine              | 11    |
| 10 | 成都中医药大学     | 21    | 10 | Jiangsu Kanion Pharmaceutical Co., Ltd.            | 8     |

### 2.4 作者合作分析

经统计得知，该领域中、英文文献研究的作者分别有 2 040、1 119 名，发文量前 15 的作者见表 3。依据普赖斯理论框架，核心作者的遴选需满足发

文量超越临界值 N 的量化标准<sup>[14]</sup>。最终，中、英文文献核心作者分别有 108 人和 94 人（中文文献≥4 篇，英文文献≥3 篇），设置中、英文文献作者发文量最小值分别为 4 和 3，可视化图谱见图 4。在中

表 3 中、英文文献发文量前 15 作者

Table 3 Top 15 authors in terms of number of published papers in both Chinese and English literature

| 序号 | 中文文献作者 (单位)    | 发文量/篇 | 序号 | 英文文献作者 (单位)               | 发文量/篇 |
|----|----------------|-------|----|---------------------------|-------|
| 1  | 乔延江 (北京中医药大学)  | 33    | 1  | Li Wenlong (天津中医药大学)      | 21    |
| 2  | 史新元 (北京中医药大学)  | 30    | 2  | Wu Zhisheng (北京中医药大学)     | 20    |
| 3  | 吴志生 (北京中医药大学)  | 23    | 3  | Qiao Yanjiang (北京中医药大学)   | 18    |
| 4  | 孙素琴 (清华大学)     | 19    | 4  | Qu Haibin (浙江大学)          | 17    |
| 5  | 瞿海斌 (浙江大学)     | 19    | 5  | Wu Yongjiang (浙江大学)       | 15    |
| 6  | 刘雪松 (浙江大学)     | 15    | 6  | Liu Xuesong (浙江大学)        | 13    |
| 7  | 周群 (清华大学)      | 15    | 7  | Zang Hengchang (山东大学)     | 12    |
| 8  | 程翼宇 (浙江大学)     | 14    | 8  | Chen Yong (浙江大学)          | 10    |
| 9  | 李文龙 (天津中医药大学)  | 13    | 9  | Wang Yuanzhong (云南省农业科学院) | 10    |
| 10 | 陈科力 (湖北中医药大学)  | 13    | 10 | Dai Shengyun (北京中医药大学)    | 9     |
| 11 | 王元忠 (云南省农业科学院) | 12    | 11 | Li Lian (山东大学)            | 9     |
| 12 | 张霁 (云南省农业科学院)  | 11    | 12 | Shi Xinyuan (北京中医药大学)     | 9     |
| 13 | 徐冰 (北京中医药大学)   | 11    | 13 | Ma Lijuan (北京中医药大学)       | 8     |
| 14 | 陈勇 (浙江大学)      | 11    | 14 | Li Zheng (天津中医药大学)        | 7     |
| 15 | 陈龙 (湖北中医药大学)   | 11    | 15 | Nie Lei (山东大学)            | 7     |

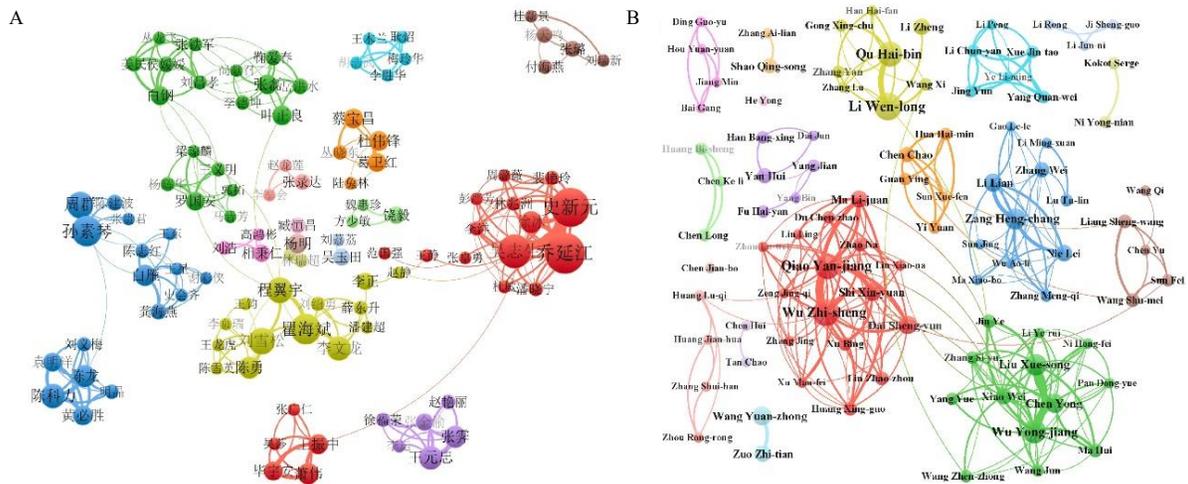


图 4 中文 (A) 与英文 (B) 作者共现图谱

Fig. 4 Co-occurrence map of authors in Chinese (A) and English (B) literature

文文献作者图谱里, 共呈现出 108 个节点以及 238 条连线; 而英文文献作者图谱中, 则包含 94 个节点与 243 条连线。乔延江 (33 篇) 和 Li Wenlong (21 篇) 分别是中、英文文献发表量最多的作者。从图谱整体形态来看, 节点分布相对密集, 节点之间连线较多, 这直观地表明 NIRS 技术在中药质量控制这一研究领域中, 各个作者彼此之间均保持着较为密切的联系。

## 2.5 关键词分析

**2.5.1 关键词共现分析** 通过分析所纳入文献的关键词, 可以确切地掌握特定领域的研究现状及研究

热点, 洞察最新的科研进展情况<sup>[15]</sup>。本研究使用 VOSviewer 进行词频统计分析, 频次排名前 25 位的关键词见表 4。中文文献高频关键词包括偏最小二乘 (PLS) 法 (100 次)、定量分析 (93 次)、指纹图谱 (90 次)、化学计量学 (87 次)、在线分析 (87 次) 等。英文文献高频关键词有 chemometrics (58 次)、quantitative analysis (45 次)、geographical origin (37 次)、partial least squares (34 次)、rapid analysis (25 次) 等。该研究将中、英文文献关键词最小值分别设定为 6 和 3, 关键词共现图谱如图 5 所示。该领域中英文文献研究主要集中在化学计量模型的开发与优化

表 4 中、英文文献排名前 25 的关键词  
Table 4 Top 25 keywords in Chinese and English literature

| 序号 | 中文文献     |     |      | 英文文献                                   |     |      |
|----|----------|-----|------|--|-----|------|
|    | 关键词      | 频次  | 首发年份 | 关键词                                    | 频次  | 首发年份 |
| 1  | 近红外光谱    | 787 | 2000 | near infrared spectroscopy             | 205 | 2007 |
| 2  | 质量控制     | 216 | 2002 | chemometrics                           | 58  | 2008 |
| 3  | 中药       | 106 | 2000 | quality control                        | 53  | 2007 |
| 4  | 偏最小二乘法   | 100 | 2000 | traditional Chinese medicine           | 48  | 2008 |
| 5  | 定量分析     | 93  | 2000 | quantitative analysis                  | 45  | 2011 |
| 6  | 指纹图谱     | 90  | 2001 | geographical origin                    | 37  | 2011 |
| 7  | 化学计量学    | 87  | 2005 | partial least squares                  | 34  | 2011 |
| 8  | 在线分析     | 87  | 2010 | rapid analysis                         | 25  | 2014 |
| 9  | 近红外漫反射光谱 | 69  | 2001 | process analytical technology          | 24  | 2012 |
| 10 | 过程分析技术   | 68  | 2006 | high performance liquid chromatography | 22  | 2007 |
| 11 | 快速分析     | 67  | 2003 | discrimination                         | 21  | 2008 |
| 12 | 定性分析     | 57  | 2004 | extraction process                     | 19  | 2012 |
| 13 | 高效液相色谱   | 51  | 2004 | identification                         | 18  | 2012 |
| 14 | 中药材      | 46  | 2000 | classification                         | 17  | 2011 |
| 15 | 中药鉴定     | 41  | 2002 | data fusion                            | 17  | 2018 |
| 16 | 鉴别       | 39  | 2000 | partial least squares regression       | 17  | 2011 |
| 17 | 产地鉴别     | 36  | 2005 | real time release testing              | 17  | 2015 |
| 18 | 主成分分析    | 35  | 2004 | support vector machine                 | 17  | 2012 |
| 19 | 支持向量机    | 34  | 2004 | adulteration                           | 16  | 2018 |
| 20 | 聚类分析     | 31  | 2004 | calibration                            | 16  | 2012 |
| 21 | 含量测定     | 30  | 2002 | variable selection                     | 16  | 2014 |
| 22 | 水分分析     | 30  | 2005 | FT-NIR spectroscopy                    | 15  | 2014 |
| 23 | 模式识别     | 29  | 2001 | nondestructive analysis                | 12  | 2020 |
| 24 | 应用       | 28  | 2002 | authentication                         | 11  | 2019 |
| 25 | 三七       | 25  | 2002 | discrimination analysis                | 10  | 2015 |

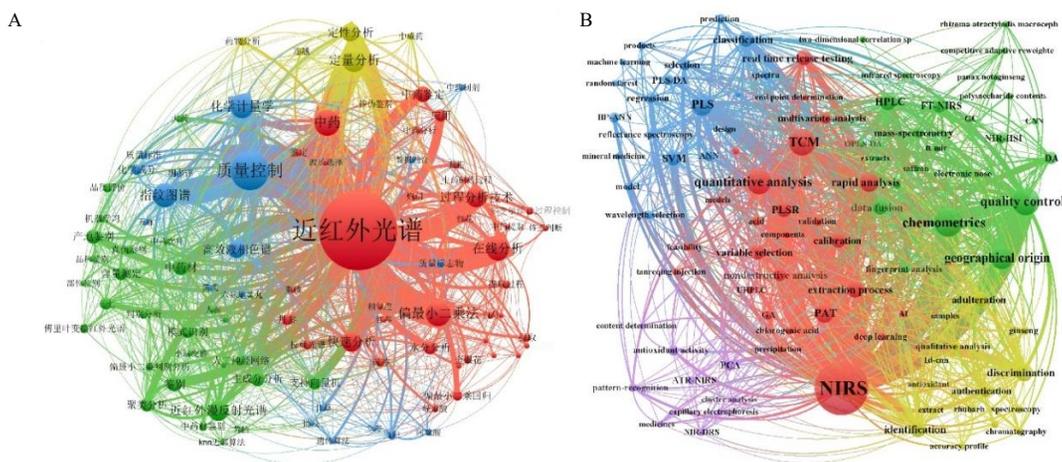


图 5 中文 (A) 与英文 (B) 文献关键词共现网络

Fig. 5 Co-occurrence network of keywords in Chinese (A) and English (B) literature

以及质量控制方法的应用。其中，在化学计量模型方面，主要包括 PLS 法、支持向量机 (SVM)、人工

神经网络、判别分析 (DA)、主成分分析 (PCA)、CA、遗传算法、小波变换等化学计量方法；在质量

控制方法的应用上, 中文文献主要集中在定量分析、定性分析、在线分析等方向。对于英文文献, 在质量控制研究对象上与中文文献相比, 仅涉及到 ginseng、Panax notoginseng、Rhubarb、saffron 等少量中药材; 在化学计量模型的开发和质量控制方法的应用等方面研究内容与中文文献相似。

**2.5.2 关键词 CA** 关键词的 CA 是在关键词共现图谱的基础上进行的, 能够更加清晰地展现该领域的研究现状和研究热点<sup>[16]</sup>。本研究运用对数似然法 (LLR) 聚类算法<sup>[14]</sup>, 针对中、英文文献

进行了关键词 CA。中、英文文献关键词聚类结果如下: 中文文献聚类模块值 ( $Q$ ) = 0.608 8, 平均轮廓值 ( $S$ ) = 0.894 3, 英文文献  $Q$  = 0.601 4,  $S$  = 0.838 5。在 CA 中, 当  $Q > 0.3$  时表明聚类结果具有有效性,  $S > 0.5$  时表明所构成的聚类结构较为合理,  $S > 0.7$  时表明聚类结果具有较高的可信度<sup>[17]</sup>。从结果来看, 本研究中、英文文献关键词的聚类结果均较为满意且具有可靠性。本研究共产生了 13 个中文文献聚类主题和 12 个英文文献聚类主题, CA 结果见图 6。

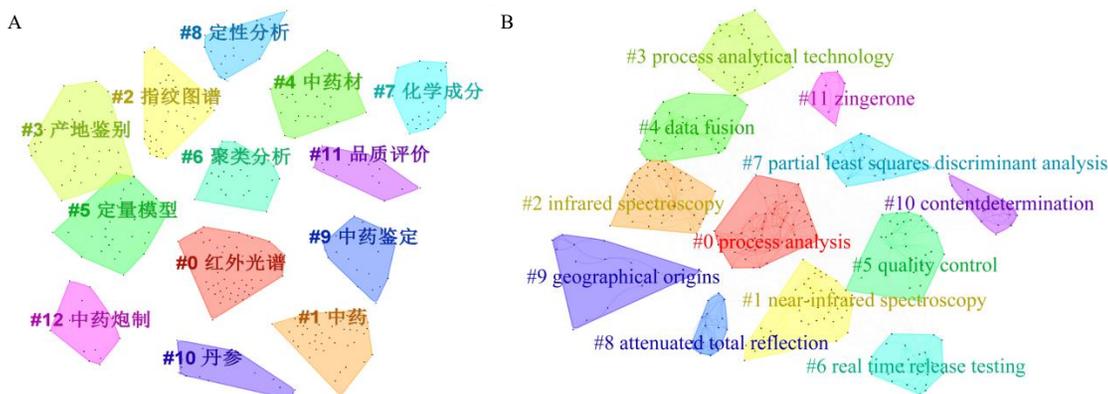


图 6 中文 (A) 与英文 (B) 关键词聚类图

Fig. 6 Clustering charts of keywords in Chinese (A) and English (B) literature

中文文献关键词聚为 3 大类, 结果见表 5。其中 #0、#4、#10、#11、#12 主要为光谱及数据分析技术类, #2、#3、#5、#7、#8、#9 主要为中药质量控制及应用拓展类, #1、#3、#5、#6、#7、#10 主要为中药及相关成分研究类。英文文献关键词聚为 3 大类, 结果见表 6。其中 #0、#1、#2、#4、#8 主要为

光谱及数据分析技术类, #3、#5、#6、#7、#9 主要为中药质量控制及应用拓展类, #1、#2、#5、#7、#9、#10、#11 主要为中药及相关成分研究类。中、英文文献均围绕光谱技术、质量控制、中药成分三大核心维度展开, 反映了中药研究中技术工具支撑质量控制, 质量控制依赖成分研究的逻辑闭环; 中文文

表 5 中文文献关键词聚类分析

Table 5 Cluster analysis of keywords in Chinese literature

| 聚类名称     | 节点数 | 轮廓值   | 首要关键词                    |
|----------|-----|-------|--------------------------|
| #0 红外光谱  | 50  | 0.941 | 红外光谱、近红外、大黄、不确定度、真伪鉴别    |
| #1 中药    | 45  | 0.853 | 中药、多元校正、三七、在线监测、鉴别       |
| #2 指纹图谱  | 43  | 0.843 | 指纹图谱、质量控制、一测多评、含量测定、定量测定 |
| #3 产地鉴别  | 40  | 0.861 | 产地鉴别、质量评价、模式识别、多糖、当归     |
| #4 中药材   | 32  | 0.871 | 中药材、快速检测、拉曼光谱、快速分析、光谱    |
| #5 定量模型  | 32  | 0.918 | 定量模型、产地、在线检测、中药制造、黄芩     |
| #6 聚类分析  | 29  | 0.853 | 聚类分析、人参、定性鉴别、白及粉、国产血竭    |
| #7 化学成分  | 25  | 0.926 | 化学成分、光谱分析、中药鉴别、指纹谱、中药饮片  |
| #8 定性分析  | 22  | 0.931 | 定性分析、定量分析、化学药物、中成药、深度森林  |
| #9 中药鉴定  | 21  | 0.828 | 中药鉴定、应用、展望、优势、近红外光谱技术    |
| #10 丹参   | 16  | 0.957 | 丹参、小波变换、丹参酮I、原儿茶醛、频谱分析   |
| #11 品质评价 | 15  | 0.943 | 品质评价、多元光谱、产地溯源、生境因子、川芎   |
| #12 中药炮制 | 12  | 0.979 | 中药炮制、快速测定、白芍、水分、实时控制     |

表 6 英文文献关键词聚类分析

Table 6 Cluster analysis of keywords in English literature

| 聚类名称   | 节点数 | 轮廓值   | 首要关键词   |
|--|-----|-------|---|
| #0 process analysis                            | 48  | 0.864 | process analysis, alcohol precipitation, near infrared spectroscopy, artificial intelligence, chemometrics  |
| #1 near-infrared spectroscopy                  | 44  | 0.757 | near-infrared spectroscopy, near infrared spectroscopy, quality evaluation, polysaccharide contents, aquaphotomics  |
| #2 infrared spectroscopy                       | 42  | 0.900 | infrared spectroscopy, <i>notoginseng</i> , nondestructive measurements, complex mixtures, convolutional neural network                                   |
| #3 process analytical technology               | 33  | 0.696 | process analytical technology, batch-to-batch reproducibility, batch process monitoring, traditional Chinese medicine, traditional Chinese medicine (TCM) |
| #4 data fusion                                 | 31  | 0.864 | data fusion, design of experiment, electronic nose, electronic tongue, laser-induced breakdown spectroscopy   |
| #5 quality control                             | 30  | 0.819 | quality control, prediction map, near-infrared spectroscopy- <i>scutellaria baicalensis</i> , <i>honeysuckle</i> extract, organic acids                   |
| #6 real time release testing                   | 24  | 0.801 | real time release testing, Chinese patent medicine, process monitoring, UPLC-Q/TOF, discriminant analysis   |
| #7 partial least squares discriminant analysis | 21  | 0.893 | partial least squares discriminant analysis, western solid dosage form, kernel extreme learning machine, <i>rhodiola</i> , consumer grade                 |
| #8 attenuated total reflection                 | 16  | 0.917 | attenuated total reflection, diffuse reflection, data driven-soft independent modeling by class, vis, cec   |
| #9 geographical origins                        | 15  | 0.883 | geographical origins, origin traceability, quality assessment, <i>bupleuri</i> radix, error-correcting output codes                                       |
| #10 content determination                      | 13  | 0.907 | content determination, quantitative model, antioxidant activity, cell-based assays, talcum  |
| #11 zingerone                                  | 7   | 0.973 | zingerone, 10-gingerol, 8-gingerol, 6-gingerol, 6-shogaol   |

献更聚焦于传统中药品种及经典技术的应用，英文文献则体现出更广泛的技术融合（新兴光谱技术、机器学习）、更系统的质量控制体系及更拓展的研究对象（现代化产品、生物活性），反映出国内外中药研究在技术路径和应用场景上的侧重不同。

**2.5.3 关键词突现分析** 突现是关键词在较短时间内备受关注的现象，能够揭示某一领域在特定时间段内备受关注的研究前沿<sup>[18]</sup>。某一领域突然兴起的研究热点可以使用 CiteSpace 的“Bursts”分析功能，从国内外研究文献中分别提取出 25 个具有突现特征的关键词，分析结果如图 7 所示。该可视化图谱中，“Begin”与“End”分别代表突变开始的时间和突变结束时间；“Strength”表示突变强度指数，数值增幅越大代表该关键词越受重视。

对于中文文献，初期阶段 2000—2015 年，围绕中药材本身展开，如对大黄、丹参、黄芩等具体中药材的研究，同时 CA、多元校正等技术被运用，并向快速测定、在线分析方向发展；近期阶段 2016—

2024 年，研究重点转向中药品质评价、中药制造等综合性领域，机器学习等新技术和新方向兴起，体现了对中药材从生产到评价的全流程关注和技术升级。对于英文文献，早期阶段主要集中在对中药材成分的定量研究，如 quantification、constituents、quantitative analysis 等关键词突出，同时也有对分类方法的探讨，如 classification 等；近年来除了继续深化定量分析相关研究，data fusion 等新技术得到应用，对特定药材如 *Panax notoginseng* 研究以及 geographical origin 的关注度提升，强调多技术融合和对中药材具体问题的深入研究。由此可得，中药质量评价、机器学习、产地溯源、中药制造以及多技术联用可能是今后的研究热点。

### 3 讨论

本研究聚焦于 NIRS 技术在中药质量控制领域应用的相关文献，运用文献计量学方法展开系统分析。研究旨在通过梳理国家、机构及作者的合作网络，结合关键词共现与突现特征，归纳 NIRS 技术

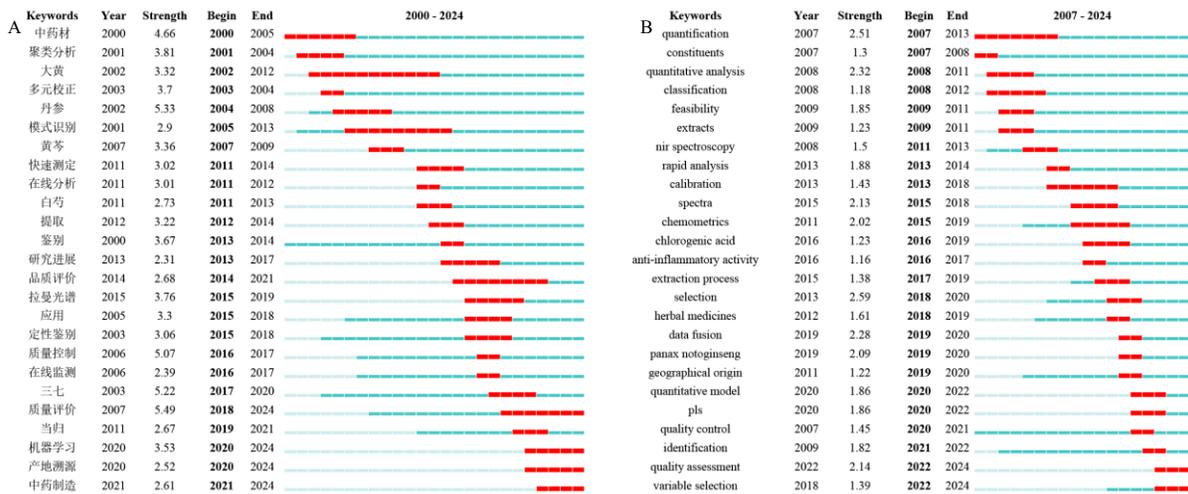


图 7 中文 (A) 与英文 (B) 文献关键词突现图谱

Fig. 7 Emergence map of Chinese (A) and English (B) literature

研究热点的演变规律,为后续研究方向提供参考依据。从文献产出与合作格局来看,我国在该领域的研究占据主导地位,乔延江、吴志生、史新元、瞿海斌、李文龙、刘雪松、王元忠等学者是其中的核心研究者。通过关键词共现及 CA 发现,当前研究热点集中于 3 个维度:一是中药定性与定量分析方法的建立,二是生产过程在线监测技术的应用,三是化学计量学模型的开发与优化。而基于关键词突现特征的趋势预测显示,中药质量评价体系构建、机器学习算法融合、产地溯源技术突破、中药智能制造升级及多技术联用创新或将成为未来的重点发展方向。

### 3.1 中药的定性和定量分析

NIRS 技术在中药定性分析中的应用,主要涵盖产地鉴别、基原鉴别及炮制品鉴别等方向。Yue 等<sup>[19]</sup>采用增量式主成分分析 (IPCA) 技术,有效提升了低成本 NIRS 仪对地黄产地来源的预测精度,为地黄的快速产地鉴别提供了可靠方法;刘珈羽等<sup>[20]</sup>通过采集不同品种白及粉的 NIRS 图,结合 CA 构建鉴别模型,为白及同属药材的精准鉴别提供了参考思路。

在传统中药炮制工艺中,炮制火候与终点的判定多依赖色泽、气味、形态等感官指标,这类定性描述主观性较强,易导致饮片质量稳定性难以有效控制。对此,方嘉雯等<sup>[21]</sup>利用 NIRS 技术针对陈皮各成分建立偏 PLS 校正模型,实现了陈皮生品与制品的精准定性鉴别,为陈皮及其炮制品的质量管控与临床合理应用提供了技术支持。

在定量分析领域,NIRS 技术主要应用于化学成分检测及水分快速测定等场景。Ming 等<sup>[22]</sup>将偏

最小二乘回归 (PLSR) 模型与反向传播人工神经网络模型相结合,对木瓜中齐墩果酸和熊果酸的总含量实现了高精度预测,为木瓜的快速质量控制奠定了基础;以王元忠<sup>[23]</sup>为核心的云南省农业科学院团队,采用经相关系数法 (CCM) 优化的 PLSR 预测模型,实现了三七中皂苷类成分的快速检测,为三七药材质控方法的优化提供了新路径;时博等<sup>[24]</sup>则通过构建基于 PLSR 模型的近红外定量分析方法,解决了知母、黄柏饮片中水分含量的快速测定问题,进一步拓展了 NIRS 在中药饮片水分检测中的应用场景。

### 3.2 生产过程的在线监测

在线监测通过对中药生产全过程的动态分析实现关键控制点的实时监控,为生产企业的质量管控与监管部门的检查工作提供了强有力的技术支持。瞿海斌团队<sup>[25]</sup>首次将拉曼光谱与 NIRS 联用,对银杏叶柱色谱过程展开实时监控。结果显示,融合模型的浓度分布预测结果与实测值的一致性显著优于单一模型,为其他中药柱色谱过程的精准控制提供了重要参考。该团队还基于 NIRS 建立了黄芪二次醇沉过程的在线定量模型,并创新性地引入精确度曲线,推动了中药 NIRS 分析方法验证的标准化进程<sup>[26]</sup>。以臧恒昌为核心的山东大学研究团队<sup>[27]</sup>将 NIRS 与中红外光谱技术相结合,开发出适用于 7 项关键质量属性定量分析的方法,成功应用于口服液中试生产的在线分析。此外,Zhang 等<sup>[28]</sup>采用人工智能算法对白芷配方颗粒逆流提取工艺进行在线监测,实现了 6 种指标成分的快速检测。研究表明,相较于传统的 PLSR 算法,人工智能算法展现出更优的性

能,这一突破为人工智能技术在复杂药物系统全生产过程质量控制中的应用奠定了基础,也为该领域的技术升级提供了新方向。

### 3.3 化学计量模型的开发与优化

常用的化学计量学方法包括 PLS 法、CA、PCA、DA 及 SVM 等,具体建模方法见表 7。在实际应用中,Yue 等<sup>[19]</sup>针对地黄构建了 PLS-DA 模型,并结合 IPCA 技术建立校准模型,为地黄质量的原位评估提供了一种便携式、低成本的检测方案;Zhong 等<sup>[29]</sup>则利用 NIRS 结合 PLS 与 SVM 算法,实现了紫草中 5 种化学成分的同时定量测定,通过对比多种光谱预处理方法和变量选择算法发现,PLS 模型性能优于 SVM 模型,且竞争性自适应重加权采样(CARS)方

法更适用于光谱特征提取。此外,Fu 等<sup>[30]</sup>将 NIRS 与声发射光谱(AE)联用,分别对沸腾制粒过程中颗粒的水分与粒径进行实时分析,最终筛选出平滑处理-一阶导数(SG-1D)结合 PLS 的 NIRS 模型,以及自动缩放(AU)结合 SVM 的 AE 模型。值得注意的是,该研究发现对光谱进行变量选择后模型预测能力反而下降,提示可能丢失了有价值的信息,因此在变量筛选过程中需重视算法的合理应用,并以模型最终准确率为核心评价标准来决定是否进行变量筛选。近年来,人工智能、卷积神经网络(CNN)、极限学习机(ELM)等机器学习算法在该领域的应用<sup>[31-33]</sup>,显著提升了数据分析与建模能力,为中药质量控制提供了更加强大的技术支撑。

表 7 NIRS 技术在中药质量控制研究中的建模方法

Table 7 Modeling methods of NIRS in quality control of TCM

| 建模算法        | 预处理算法                           | 变量选择算法           | 研究对象 | 分析内容                | 参考文献 |
|-------------|---------------------------------|------------------|------|---------------------|------|
| PLS-DA      | SNV、1D、2D、SG、MSC、BC、AU、MC、WT、DE | CARS、GA、UVE      | 地黄   | 产地鉴别(定性)            | 19   |
| PLS-DA、PLSR | 9S、SNV、MSC、2D9S、1D9S            | CARS、IRIV、GA     | 陈皮   | 炮制品鉴别及有效化学成分(定性及定量) | 21   |
| PLSR、SVM    | SNV、1D、2D、SG、MSC、BC             | CARS、MCUVE、siPLS | 紫草   | 有效化学成分(定量)          | 29   |
| PLSR、SVM    | SG、1D、2D、SNV、AU                 | siPLS、siSVM      | 养胃颗粒 | 水分(定量)              | 30   |
| CTM         | SNV、1D、2D                       | —                | 黄芪   | 真伪判别(定性)            | 34   |

CTM-一致性测试模型;SNV-标准正态变换;MSC-多元散射校正;MSC-多元散射校正;BC 基线校正;MC-均值中心化;WT-小波变换;DE-去趋势;GA-遗传算法;UVE-无信息变量消除;9S-9 点平滑;IRIV 迭代保留信息变量;MCUVE-蒙特卡罗无信息变量消除;siPLS-协同区间偏最小二乘;siSVM-协同区间支持向量机。

CTM-consistency testing model;SNV-standard normal variate transformation;MSC-multiplicative scatter correction;BC-baseline correction;MC-mean centring;WT-wavelet transform;DE-detrending;GA-genetic algorithms;UVE-uninformative variable elimination;9S-nine point Smoothing;IRIV-iteratively retained information variable;MCUVE-monte carlo uninformative variable elimination;siPLS-synergy interval partial least squares;siSVM-synergy interval support vector machine.

NIRS 技术在中药质量控制领域的研究已构建起以定性定量分析、生产过程在线监测及化学计量模型优化为核心的三大技术支柱,有力推动了中药质量评价向标准化与智能化方向迈进。当前研究呈现出三大鲜明特征:其一,技术应用维度从单一成分检测向多维度质量评价延伸。从产地溯源到炮制工艺鉴别等场景的拓展,充分彰显了 NIRS 技术在复杂中药体系中的适配性,能够更全面地响应中药质量评价的多元化需求。其二,分析方法模式从静态离线向动态在线升级。通过与拉曼光谱、声发射光谱等技术形成融合策略,为中药生产全过程的质量控制提供了实时监测方案。其三,建模方法体系从传统化学计量学向人工智能驱动的机器学习跨

越。CNN、ELM 等算法的引入,大幅提升了对复杂光谱数据的解析精度与效率,为破解中药质量控制中的非线性、高维度问题提供了新路径。

### 3.4 研究存在的问题

本研究基于文献计量学的原理与方法,系统梳理并分析了 NIRS 技术在中药质量控制领域应用的相关文献,直观呈现了该领域的研究现状、热点演变等核心信息。但研究仍存在两方面局限:其一,当前 NIRS 技术在中药质量控制中的应用,虽已在中药材、加工品等领域开展了深入研究,但针对中药制剂的研究相对薄弱,尚未形成对中药质量的全方位覆盖;其二,成果转化存在短板,研究团队与生产企业间的联动机制有待强化,科研成果向产业

实践的转化效率需进一步提升。

#### 4 结语与展望

NIRS 技术在中药领域的发展空间广阔。一方面,技术层面需持续迭代优化,例如通过提升数据处理算法的准确性与效率,增强对中药复杂成分体系的分析能力;另一方面,跨学科融合的趋势将愈发显著,与生物信息学、材料科学等学科的交叉协作,有望孕育出更多创新性研究成果,如开发新型智能中药检测设备、构建多学科融合的中药质量综合评价体系等,为中药现代化研究注入新动能,推动中医药领域向更高质量、更具科学性的方向持续发展。

**利益冲突** 所有作者均声明不存在利益冲突

#### 参考文献

- [1] Pasquini C. Near infrared spectroscopy: A mature analytical technique with new perspectives - A review [J]. *Anal Chim Acta*, 2018, 1026: 8-36.
- [2] Bu D S, Wan B Y, McGeorge G. A discussion on the use of prediction uncertainty estimation of NIR data in partial least squares for quantitative pharmaceutical tablet assay methods [J]. *Chemom Intell Lab Syst*, 2013, 120: 84-91.
- [3] Ecartot M, Bączyk P, Tessarotto L, et al. Rapid phenotyping of the tomato fruit model, Micro-Tom, with a portable VIS-NIR spectrometer [J]. *Plant Physiol Biochem*, 2013, 70: 159-163.
- [4] 王小鹏, 张璐, 陈鹏举, 等. 近红外光谱技术应用于中药四类味觉分类辨识的可行性分析 [J]. *中草药*, 2023, 54(4): 1076-1086.  
Wang X P, Zhang L, Chen P J, et al. Feasibility analysis of near-infrared spectroscopy technology applied to classification and identification of four kinds of taste in traditional Chinese medicine [J]. *Chin Tradit Herb Drugs*, 2023, 54(4): 1076-1086.
- [5] 范林宏, 范文翔, 韦志强, 等. 近红外光谱技术结合化学计量学在中药分析中的应用现状 [J]. *中国实验方剂学杂志*, 2019, 25(24): 205-210.  
Fan L H, Fan W X, Wei Z Q, et al. Application status of near infrared spectroscopy combined with chemometrics in analysis of traditional Chinese medicine [J]. *Chin J Exp Tradit Med Form*, 2019, 25(24): 205-210.
- [6] 刘昆元, 李郁章. 《化学计量学导论》评介 [J]. *化学通报*, 1992, 55(5): 64.  
Liu K Y, Li Y Z. Review of introduction to chemometrics [J]. *Chemistry*, 1992, 55(5): 64.
- [7] Samanta S, Rautaray B, Swain D K. Intellectual structure and pattern of publication in the *International journal of innovation science*: A bibliometric study [J]. *Int J Innov Sci*, 2023, 15(2): 279-301.
- [8] Chen C M, Song M. Visualizing a field of research: A methodology of systematic scientometric reviews [J]. *PLoS One*, 2019, 14(10): e0223994.
- [9] 付健, 丁敬达. Citespace 和 VOSviewer 软件的可视化原理比较 [J]. *农业图书情报*, 2019, 31(10): 31-37.  
Fu J, Ding J D. Comparison of visualization principles between citespace and VOSviewer [J]. *Agric Libr Inf*, 2019, 31(10): 31-37.
- [10] 鄢贵, 龚普阳, 张复中, 等. 基于 CiteSpace 和 VOSviewer 的白芍研究现状及研究热点可视化分析 [J]. *中草药*, 2024, 55(11): 3805-3815.  
Yan G, Gong P Y, Zhang F Z, et al. Visualization analysis of research status and hotspots of *Paeoniae Radix Alba* based on CiteSpace and VOSviewer [J]. *Chin Tradit Herb Drugs*, 2024, 55(11): 3805-3815.
- [11] Wang Y, Mei M H, Ni Y N, et al. Combined NIR/MIR analysis: A novel method for the classification of complex substances such as *Illicium verum* hook. F. and its adulterants [J]. *Spectrochim Acta A Mol Biomol Spectrosc*, 2014, 130: 539-545.
- [12] Dong W J, Ni Y N, Kokot S. Quantitative analysis of two adulterants in *Cynanchum stauntonii* by near-infrared spectroscopy combined with multi-variate calibrations [J]. *Chem Pap*, 2012, 66(12): 1083-1091.
- [13] Ni Y N, Li B H, Kokot S. Discrimination of *Radix Paeoniae* varieties on the basis of their geographical origin by a novel method combining high-performance liquid chromatography and Fourier transform infrared spectroscopy measurements [J]. *Anal Methods*, 2012, 4(12): 4326-4333.
- [14] 唐荣, 魏欣, 马江, 等. 基于 CiteSpace 科学知识图谱分析石榴皮研究现状及热点 [J]. *中草药*, 2023, 54(12): 3949-3961.  
Tang R, Wei X, Ma J, et al. Research status and hotspot of *Granati Pericarpium* based on CiteSpace scientific knowledge graph analysis [J]. *Chin Tradit Herb Drugs*, 2023, 54(12): 3949-3961.
- [15] 商杰, 易海燕, 刘明贵, 等. 国内外中药酒制相关研究的可视化分析 [J]. *中国药房*, 2023, 34(14): 1774-1780.  
Shang J, Yi H Y, Liu M G, et al. Visualization analysis of related research on wine processing of Chinese medicine at home and abroad [J]. *China Pharm*, 2023, 34(14): 1774-1780.
- [16] 孔凡乐, 纪瑞锋, 何新. 基于 VOSviewer 与 CiteSpace 的植物类药材农残检测研究热点与趋势分析 [J]. *中草药*, 2024, 55(5): 1652-1664.  
Kong F L, Ji R F, He X. Hot spots and trends analysis of pesticide residue detection of botanical medicinal

- materials based on VOSviewer and CiteSpace [J]. Chin Tradit Herb Drugs, 2024, 55(5): 1652-1664.
- [17] 郝嘉树. 基于关键词聚类的领域本体层次关系半自动构建研究 [J]. 情报科学, 2016, 34(4): 59-61, 79.  
Hao J S. Research on semi-automatically constructing domain ontology hierarchy using keywords clustering [J]. Inf Sci, 2016, 34(4): 59-61, 79.
- [18] 张勇. 我国高校阅读推广研究演进路径、热点与趋势分析 [J]. 图书馆工作与研究, 2020(8): 87-97.  
Zhang Y. Research on reading promotion of Chinese universities evolution path, hotspots and trends [J]. Libr Work Study, 2020(8): 87-97.
- [19] Yue J N, Gao L L, Zhong L, et al. Comparison of qualitative and quantitative performance of two portable near-infrared spectrometers for intact *Rehmanniae Radix* and calibration transfer [J]. Microchem J, 2024, 204: 111130.
- [20] 刘珈羽, 李峰庆, 郭换, 等. 白及粉品种近红外快速定性鉴别模型的建立 [J]. 成都中医药大学学报, 2018, 41(1): 34-37.  
Liu J Y, Li F Q, Guo H, et al. Establishment of rapid NIRS qualitative identification model of *rhizoma Bletilla* powder varieties [J]. J Chengdu Univ Tradit Chin Med, 2018, 41(1): 34-37.
- [21] 方嘉雯, 麦淑仪, 孟江, 等. 基于近红外光谱的陈皮炮制品快速质量评价研究 [J]. 广东药科大学学报, 2023, 39(1): 79-87.  
Fang J W, Mai S Y, Meng J, et al. Study on the rapid quality evaluation of processed *Citri reticulatae Pericarpium* based on near-infrared spectroscopy [J]. J Guangdong Pharm Univ, 2023, 39(1): 79-87.
- [22] Ming J, Liu M J, Lei M, et al. Rapid determination of the total content of oleanolic acid and ursolic acid in *Chaenomelis Fructus* using near-infrared spectroscopy [J]. Front Plant Sci, 2022, 13: 978937.
- [23] Li C P, Zuo Z T, Wang Y Z. Optimization of Fourier transform near-infrared spectroscopy model in determining saponin compounds of *Panax notoginseng* roots [J]. Vib Spectrosc, 2024, 130: 103615.
- [24] 时博, 谢惠英, 雷敬卫, 等. 近红外光谱法在知母和黄柏饮片水分分析中的应用 [J]. 中华中医药学刊, 2017, 35(3): 669-672.  
Shi B, Xie H Y, Lei J W, et al. Application of near-infrared spectroscopy in determination of moisture content in *Anemarrhena rhizome* and bark of Chinese corktree [J]. Chin Arch Tradit Chin Med, 2017, 35(3): 669-672.
- [25] Zhang S J, Zhang S, Gong X C, et al. Real-time monitoring of the column chromatography process of *Ginkgo biloba* using near-infrared and Raman spectroscopy combined with spectral fusion strategy [J]. Process Biochem, 2024, 145: 50-62.
- [26] Li W L, Luo Y, Wang X, et al. Development and validation of a near-infrared spectroscopy method for multicomponent quantification during the second alcohol precipitation process of *Astragali Radix* [J]. Separations, 2022, 9(10): 310.
- [27] Zhang J, Xu X H, Li L, et al. Multi critical quality attributes monitoring of Chinese oral liquid extraction process with a spectral sensor fusion strategy [J]. Spectrochim Acta A Mol Biomol Spectrosc, 2022, 278: 121317.
- [28] Zhang M Y, Lin B R, Ma X B, et al. Application of artificial intelligence combined with near infrared spectroscopy in the continuous counter-current extraction process of *Angelica dahurica* formula granules [J]. Spectrochim Acta Part A Mol Biomol Spectrosc, 2024, 322: 124748.
- [29] Zhong Y Q, Li J Q, Li X L, et al. Near infrared spectroscopy for simultaneous quantification of five chemical components in *Arnebiae Radix* (AR) with partial least squares and support vector machine algorithms [J]. Vib Spectrosc, 2023, 127: 103556.
- [30] Fu H, Teng K X, Shen Y F, et al. Quantitative analysis of moisture content and particle size in a fluidized bed granulation process using near infrared spectroscopy and acoustic emission combined with data fusion strategies [J]. Spectrochim Acta A Mol Biomol Spectrosc, 2024, 305: 123441.
- [31] Peng C, Zhang M Y, Kong M D, et al. Integrating deep learning and near-infrared spectroscopy for quality control of traditional Chinese medicine extracts [J]. Microchem J, 2024, 205: 111310.
- [32] Wang T T, Xu Z Y, Hu H Q, et al. Identification of turtle-shell growth year using hyperspectral imaging combined with an enhanced spatial-spectral attention 3DCNN and a transformer [J]. Molecules, 2023, 28(17): 6427.
- [33] Ding R, Yu L H, Wang C H, et al. Quality assessment of traditional Chinese medicine based on data fusion combined with machine learning: A review [J]. Crit Rev Anal Chem, 2024, 54(7): 2618-2635.
- [34] 苏蕊, 杨泳琳, 贺军权, 等. 基于近红外光谱结合化学计量学的黄芪细粉质量控制方法研究 [J]. 中兽医医药杂志, 2024, 43(3): 58-61.  
Su R, Yang Y L, He J Q, et al. Quality control of *Astragalus* fine powder by NIR spectroscopy combined with chemometrics [J]. J Tradit Chin Vet Med, 2024, 43(3): 58-61.