

1985年—2023年遥感地表温度研究进展与展望

刘纯¹, 包雯慧¹, 吴骅³, 段四波⁴, 曹彪², 殷志祥¹, 吴鹏海^{1,2,5}

1. 安徽大学 资源与环境工程学院, 合肥 230601;
2. 遥感与数字地球全国重点实验室, 北京 100101;
3. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101;
4. 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所, 北京 100081;
5. 信息材料与智能感知安徽省实验室(安徽大学), 合肥 230601

摘要: 地表温度是区域和全球地表物理过程中的关键参数, 基于遥感的地表温度研究得到国内外学者的广泛关注。本文基于 Web of Science 核心数据库, 利用 VOSviewer 和 CiteSpace 软件对 1985 年—2023 年间收录的关于遥感地表温度的论文进行文献计量研究, 分析了文献数量、研究机构和国家、作者、发文期刊和关键词等信息, 并结合当前研究热点展望未来趋势。结果表明: (1) 遥感地表温度近年来呈现快速增长的趋势, 中美两国在该领域研究贡献尤为突出。中国学者在遥感地表温度领域发挥着中流砥柱的作用, 各机构间展现了密切的合作关系, 并呈现出国际化的研究格局; (2) 遥感地表温度的研究领域仍以基础学科为主, 并逐渐转向应用学科, 在载文期刊中, Remote Sensing 以 714 篇的发文量位居第一, 而 Remote Sensing of Environment 的总被引次数遥遥领先; (3) AVHRR、MODIS、Landsat 等地表温度数据被广泛使用, 研究爆发词由早期的植被指数、土壤等转移到机器学习、局部气候带等新领域。重建、降尺度与时空融合等方向成为遥感地表温度领域近十年的新兴研究热点。

关键词: 遥感, 地表温度, 文献计量学, 研究热点, 发展趋势, 应用领域, 卫星数据

中图分类号: TP701/P2

引用格式: 刘纯, 包雯慧, 吴骅, 段四波, 曹彪, 殷志祥, 吴鹏海. 2025. 1985 年—2023 年遥感地表温度研究进展与展望. 遥感学报, 29(7): 2328–2344

Liu C, Bao W H, Wu H, Duan S B, Cao B, Yin Z X and Wu P H. 2025. Bibliometrics Research and Analysis of Remotely Sensed Land Surface Temperature. National Remote Sensing Bulletin, 29(7): 2328–2344 [DOI: 10.11834/jrs.20244078]

1 引言

地表温度 LST (Land Surface Temperature) 是表征地表过程变化的重要特征物理量, 是地—气间物质与能量交换、气候变化等众多基础学科研究中不可或缺的参数 (徐希孺等, 1998; Hansen 等, 2010)。同时, 地表温度研究在数值预报、农情估产、灾情监测、生态环境评估等方面满足国家的重大应用需求 (覃志豪等, 2005; Weng, 2009; 徐涵秋, 2013; Zhao 等, 2020)。对地表温度的新认识可以提高对全球和区域尺度上基础研究过程的理解, 并为各种潜在应用提供有价值的地表状态度量。

由于在重返周期和空间覆盖方面的优势, 卫星遥感反演是目前获取区域或全球尺度地表温度的重要手段 (Li 等, 2013, 2023), 主要包括热红外遥感反演和被动微波遥感反演。经过几十年的发展, 热红外地表温度和被动微波地表温度研究均取得不错的进展, 特别是基于物理机制的热红外遥感地表温度反演已经趋向成熟, 其产品精度和空间分辨率已被学术界广泛接受 (李召良等, 2016; 段四波等, 2021; 丁利荣等, 2023)。空间分辨率较低的被动微波遥感具有全天候的特点, 其地表温度产品可作为热红外地表温度在不利天气条件下的有效补充 (Duan 等, 2017; Xu 和 Cheng, 2021; Wu 等, 2022)。国外内学者围绕遥

收稿日期: 2024-03-06; 预印本: 2024-06-17

基金项目: 国家自然科学基金(编号:42271381); 遥感科学国家重点实验室开放研究基金课题(编号:OFSLRSS202205)

第一作者简介: 刘纯, 研究方向为热红外遥感智能处理与应用。E-mail: liuchun030810@163.com

通信作者简介: 吴鹏海, 研究方向为热红外遥感智能处理与应用。E-mail: wuph@ahu.edu.cn

感地表温度的不同方向开展了大量研究, 积累了丰富的研究成果; 在此基础上, 部分学者对遥感地表温度研究成果进行了系统性综述 (Li 等, 2013, 2023; 李冉 等, 2022; Wu 等, 2021; Tomlinson 等, 2011; Mo 等, 2021; 吴骅 等, 2021; Zhan 等, 2013; 朱金顺 等, 2021), 他们大多从文献内容本身出发, 高屋建瓴地综述各个方向的研究结果和发展动向。

与传统的文献综述不同, 文献计量学是使用统计和数学方法对文献信息进行定量分析的学科, 通过研究文献的数量、分布、引用关系、关键词等, 揭示科研领域的发展趋势和研究热点 (Garfield, 1955)。从一个学科的研究角度单独观察、探究和评价存在主观性。通过文献计量方法对相关文献进行定量分析, 可以深入了解知识在时空上的分布、数量关系及变化规律。在过去的研究中, 有学者通过该方法对整个遥感学科 (冯筠和郑军卫, 2005; 黄铭瑞 等, 2023) 或遥感部分领域做了文献计量学分析, 如全球湿地高光谱遥感 (孙伟伟 等, 2023)、智慧农业 (郑倩 等, 2023)、土地退化评价指标 (许宁 等, 2008)、时间序列 (Ebrahim 等, 2020) 等。从国际上看, 遥感地表温度已被全球气候观测系统等机构认定为“陆地生物圈十项重要气候变量之一”、“地表关键参数”; 从中国近十年国家自然科学基金项目申请资助来看, 遥感地表温度也已成为遥感科学领域的主要研究热点之一 (熊巨华 等, 2023)。此外, 随着人工智能科学研究新范式的发展 (毛克彪 等, 2023a)、遥感地表温度产品的指数型增长 (Jia 等, 2023; Tang 等, 2024)、遥感地表温度应用的深度挖掘 (Li 等, 2023) 以及国际合作的加强, 使遥感地表温度的经典研究方向焕发新生, 也涌现了一些新的、交叉的研究成果。鉴于此, 本研究对 Web of Science 核心数据集收录的遥感地表温度相关文献进行系统分析, 在梳理文献特征的基础上, 从文献的基本特征出发, 多角度深入挖掘地表温度近年来的研究热点和演化趋势。

2 研究方法 with 数据源

2.1 研究方法

本研究主要运用 VOSviewer (version 1.1.19) 和 CiteSpace (version 5.7) 两款可视化软件进行文

献计量分析。VOSviewer 是荷兰莱顿大学科技研究中心的 Waltman 和 Van 两位学者在 2009 年开发的用来可视化和构建文献计量网络的软件 (van Eck 和 Waltman, 2010)。它可以支持合作分析 (作者、机构、国家)、关键词共现分析等功能, 提供聚类视图、标签视图、密度视图 3 种可视化方式, 具有图像美观、易于分析的优点。CiteSpace 是一款使用 Java 语言开发的可视化软件, 能够对突变词进行统计, 同时其能清晰反映出某个聚类中文献随时间变化的过程, 能够对学科每个阶段的研究热点和演化发展历程进行分析和预测 (Chen, 2006)。总体而言, 这两款软件在文献计量分析方面具有较强的技术和功能优势。此外, 为了更全面地了解研究领域, 本研究还结合传统文献计量学关键词检索与深入阅读的方式, 通过统计和发掘遥感地表温度在各个研究方向的文献分布情况, 以图谱的形式展现该领域各个研究方向的发展演化轨迹, 为后续细致分析和全面综述提供了基础。

2.2 数据源

Web of Science 数据库是国际公认的权威的综合性学术资源数据库, 核心库中自然科学引文索引 (SCI) 以及社会科学引文索引 (SSCI) 是目前国际上影响力最强的两大检索数据库, 可以反映特定研究主题的科技水平 (邱均平和王明芝, 2010)。为了保证数据的准确性和可靠性, 本文以 Web of Science 核心合集数据库作为文献来源, 引文索引选择 SCI-EXPANDED 和 SSCI, 以 (“land surface temperature” or LST) and (“remot* - sens*” or satellite) 为主题进行检索, 当相关术语出现在标题、摘要、关键词中的任意一个或者多个时, 该文章被检索成功。检索时间范围限制为 1985-01-01—2023-10-31。在获得初步检索文献后, 通过人工判读的方式, 根据文献的摘要和关键词, 逐一审查并剔除与研究主题不直接相关的文献, 得到 5336 篇有效文献。

3 数据基本特征分析

3.1 发文量以及研究领域分析

某一领域的论文年发表数量在一定程度上能够反映该领域的发展动态与未来趋势, 是研究该领域的重要指标。在本文设定的检索时间范围内,

遥感地表温度研究的逐年发文数量及累计发文量如图1所示。

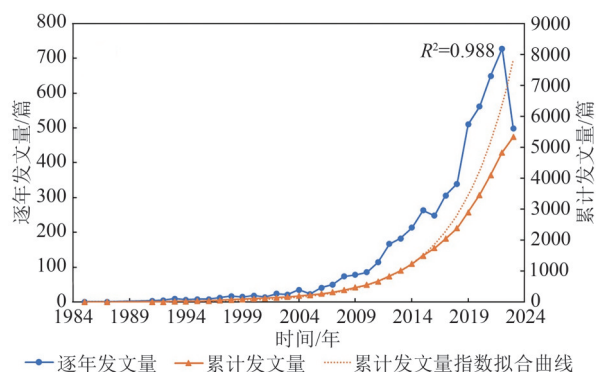


图1 1985年—2023年遥感地表温度领域逐年发文量及累计数量(该数据检索至2023-10-31,仅限于WoS核心合集数据库)

Fig. 1 Year-by-year and cumulative number of publications in the field of remote sensed land surface temperature from 1985 to 2023 (This data was retrieved until 2023-10-31, limited to the WoS Core Collection database)

在设定的时间范围内,本文共检索5336篇遥感地表温度相关的研究文献,年均发文量为136.8篇。总体看来,在近40年整体呈现快速上涨趋势,仅个别年份之间存在较小波动。1985年—2004年处于研究起步阶段,有关遥感地表温度(以下简称LST)领域的发文数量相对较少,共计203篇,仅占总发文数量的3.8%;随着卫星数量的增加、各种传感器的快速发展,遥感地表温度产品日益丰富(Ma等,2020,Wan,2013),加之3S技术在各行各业的广泛应用,不断促进遥感地表温度数据处理及其数据产品的应用与发展。2005年—2011年的年发文数呈现快速增长的趋势,以约20—30篇/年的速率逐步增加。自2012年起,年发文数量迅猛增长,且年发文数量均超过100篇,上升增幅较前两阶段有较大提升;其中,2016年出现短暂缩减,为248篇;2018年—2019年发文量增幅最大,2022年发文量达728篇,位居首位,为年均发文量的5倍之多。此外,通过对1985年—2023年累计发文数据进行回归分析,得到指数拟合曲线($R=0.988$),呈现快速增长的趋势。综上所述可知,遥感地表温度研究越来越受到学者的关注。

检索到的文献共涵盖SCI数据库中101个学科类别,以约10年作为时间间隔,分别统计1985年—

1994年、1995年—2004年、2005年—2014年和2015年—2023年4个时间段涵盖的所有学科主题,选取其中最常见、发文数排名靠前的8类学科,图2展现了各学科领域发文量随时间变化情况。结果表明,各个研究方向文献在2015年—2023年出现爆发式增长,其中发文数排名前4的分别为环境生态学(共2459篇,占23.6%)、遥感(共2266篇,占21.8%)、成像科学与摄影技术(共1936篇,占18.6%)和地质学(共1445篇,占13.9%),上述4个领域发文数量均超过1000篇,共占总发文数量约77.9%,且呈现持续上涨态势。通过对比不同阶段各学科领域发文数量能够发现,其增长速率存在较大波动。在1985年—1994年期间,气象与大气科学方向发文数量处于首位,随后在1995年—2004年和2005年—2014年两个时间段,遥感方向发文数量均排名第一,但在2015年—2023年,环境生态学方向发文数量快速增长,超越遥感位列第一。不同时间段下各领域发文数量的排名变化表明,LST领域的研究重点并非一成不变,而是不断变化,在不同学科类别间发生转移,即由基础学科为主,逐渐向应用学科转移。

3.2 发文国家和机构分析

使用VOSviewer制作国家辐射热点图,图3中反映了各国发文量与影响力的关系。发文量越多的国家,辐射圈越大,颜色越深,代表该国家在该领域的影响力越大。可以看出发文量较多的国家有中国、美国、印度、德国、西班牙等。其中,中国和美国的影响力最大。

共有138个国家和地区发表了和遥感地表温度有关的研究论文,图4列出了发文数量排名前十的国家。中国以2169篇发文量位居榜首,占该领域的39.57%,其次是美国,共计发文量为1422篇,占比25.94%。值得注意的是,中国和美国发文量明显领先于其他国家,两国发文量占比近2/3。印度以393篇位列第3,而3—10名总发文量相差不多。

为了可视化表达机构间合作关系,本文采用合作共现方式来构建机构合作网络。合作共现分析通过建立机构合作网络,能够清晰展现不同机构间的合作关系及合作程度。图5为1985年—

2023年各科研机构或高校间的合作可视化图谱。节点的大小表示机构的合作次数，节点越大，表明该机构合作的次数越多；节点连线代表合作强

度，连线越粗，表明机构间的合作越紧密。从图5中可以看出，研究机构之间存在着相对较高的密切合作关系。

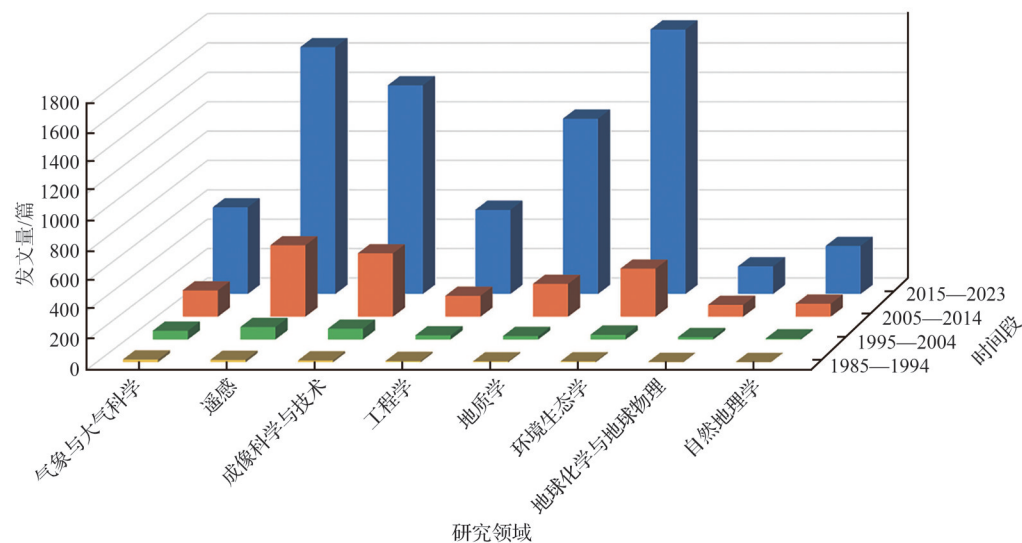


图2 1985年—2023年遥感地表温度领域的8大学科类别发文量随时间变化

Fig. 2 The number of published documents of eight subject categories in the field of remote sensed land surface temperature from 1985 to 2023 changes over time

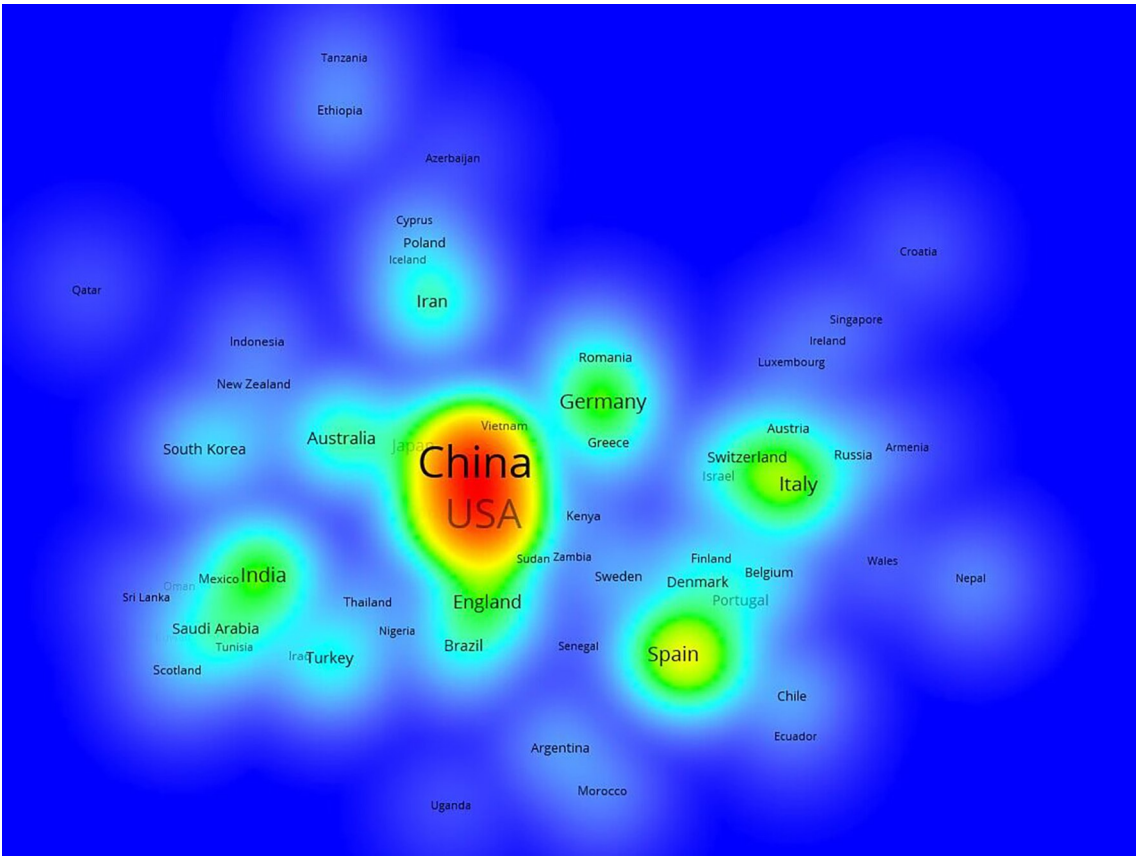


图3 1985年—2023年遥感地表温度领域国家辐射热点图

Fig. 3 National radiation hot spot map in the field of remote sensed land surface temperature from 1985 to 2023

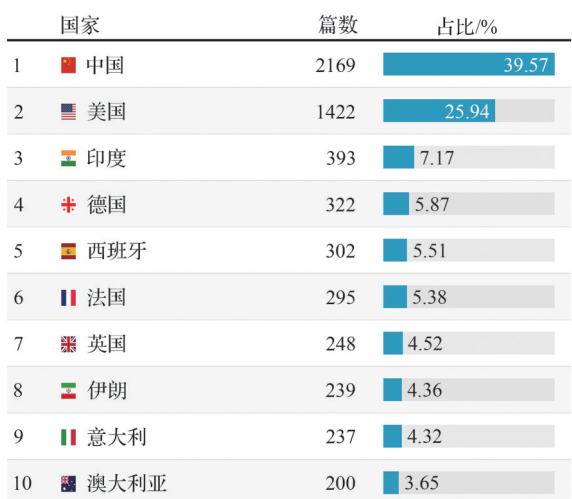


图4 1985年—2023年遥感地表温度领域排名前10国家发文数量

Fig. 4 The number of papers published by the top ten countries in the field of remote sensed land surface temperature from 1985 to 2023

总连接强度作为衡量机构合作程度的一个指标，能够在一定程度上反映出该机构的合作活跃度和规模。在此，我们将中国科学院以及中国科学院相关研究所合并到中国科学院。中国科学院以最多的合作次数脱颖而出，从表1可以看出其总连接强度为535，与超过50个机构均有合作，说明其合作程度高、合作规模大，在国际上具有较高的影响力，扮演了至关重要的桥梁角色，促进了科学研究领域的交流与协作。紧随其后的是北京师范大学，总连接强度为202，表明了它在合作网络中的高度活跃性。具体来看，北京师范大学的主要合作伙伴多位于北京地区，彼此之间地理位置较为接近，包括中国农业科学院、北京大学和中国地震局等知名机构，这些合作关系有助于推动区域内学术研究的深入发展。

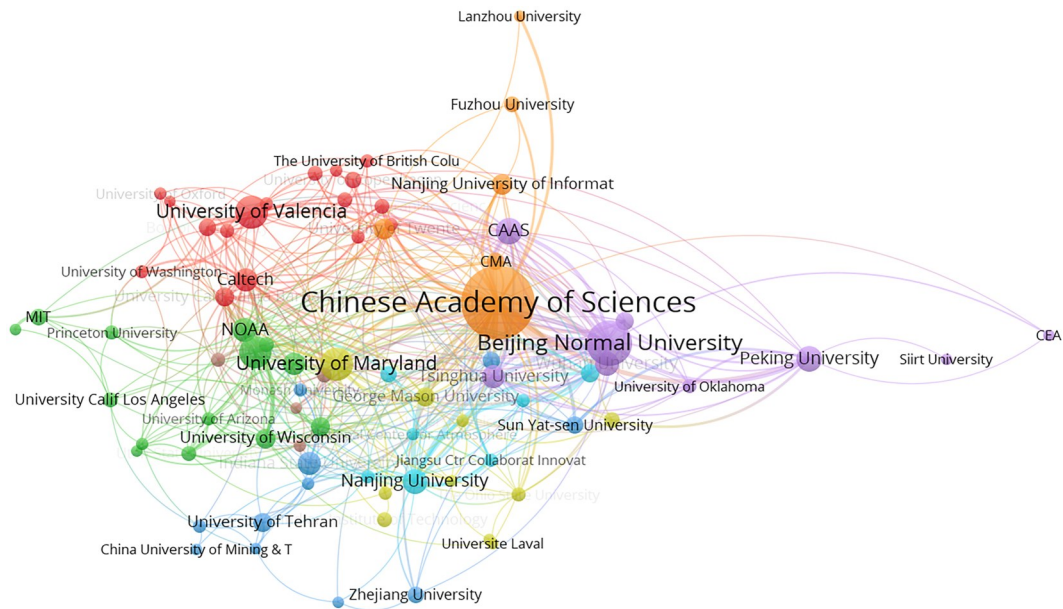


图5 1985年—2023年遥感地表温度领域机构合作关系共现图(部分国内机构以缩写呈现)

Fig. 5 Co-occurrence of institutional partnerships in the field of remote sensed land surface temperature from 1985 to 2023 (Some domestic institutions are presented in abbreviations)

表1 1985年—2023年遥感地表温度领域排名前10机构发文数量

Table 1 The number of papers published by the top ten institutions in the field of remote sensed land surface temperature from 1985 to 2023

机构	国家	发文量/篇	总连接强度
中国科学院 (Chinese Academy of Sciences)	中国	1694	535
马里兰大学 (University of Maryland)	美国	288	92
中国农业科学院 (Chinese Academy of Agricultural Sciences)	中国	283	110
北京师范大学 (Beijing Normal University)	中国	267	202
法国国家科学研究中心 (Centre National de la Recherche Scientifique)	法国	216	59
美国航空航天局 (National Aeronautics and Space Administration)	美国	211	78

续表			
机构	国家	发文量/篇	总连接强度
美国农业部(United States Department of Agriculture USDA)	美国	135	30
加利福尼亚大学(University of California)	美国	131	55
武汉大学(Wuhan University)	中国	130	34
美国国家海洋和大气管理局(National Oceanic and Atmospheric Administration)	美国	114	23

此外，机构的合作关系分布与距离密切相关。绿色聚类以美国的知名高校、研究机构和企业为主，包括麻省理工大学（MIT）、NASA（美国国家航空航天局）、NOAA（美国国家海洋和大气管理局）、马里兰大学（University of Maryland）等；紫色聚类主要是以中国为核心的中国高校和研究机构，如北京大学（Peking University）、清华大学（Tsinghua University）和武汉大学（Wuhan University）；红色聚类的机构分布则较为分散，以欧洲、美国一些高校和研究机构为主，如巴伦西亚大学（University of Valencia）、米兰理工大学（Polytechnic University of Milan）、牛津大学（University of Oxford）等。共有来自全世界4043个机构参与遥感地表温度方向的研究，从表1可以看出，前10名总发文量3355篇，占总数的62.87%。在所有发文机构中，中国科学院的发文量为1694篇，约是第2名的5.9倍。在发文量排名前10的机构中，有4家机构来自中国，5家机构来自美国，两国在机构发文量上表现的明显优势再次表明，中美两国在遥感地

表温度领域研究处于领先地位。

3.3 主要作者分析

对发文作者的分析能够揭示研究人员在遥感地表温度领域的科研水平以及对该领域技术前沿的贡献，从而获悉该研究领域的代表学者和核心研究力量。表2列出了其中文章发表数量排名前10的作者及其主要机构（发文量最多机构）、通讯作者或第一作者发文数、论文总被引次数、篇被引次数等。发文量前3名分别是李召良、Sobrinho JA和占文凤；作为第一作者或通讯作者发文量前3名分别是李召良、占文凤和翁齐浩；总被引次数前3名分别是Sobrinho JA、翁齐浩和李召良；篇被引次数前3名分别是Sobrinho JA、翁齐浩和Trigo IF；H-index前3名分别是翁齐浩、李召良、和Sobrinho JA。此外，统计发现，排名前十的作者中共有7位学者来自中国，其中有4位来自中国科学院，可见中国学者已成为该领域中不可或缺的中坚力量，中国在该领域的研究已位于世界前列。

表2 1985年—2023年遥感地表温度领域发文数量排名前10的作者
Table 2 The top ten authors in the field of remote sensing of land surface temperature from 1985 to 2023

排名	作者	主要机构	发表 文章数/篇	第一作者或 通讯作者发文量/篇	总被引 次数	篇被引 次数	H-index
1	Li ZL	Chinese Academy of Agricultural Sciences	116	55	6552	56.48	38
2	Sobrinho JA	University of Valencia	71	29	8759	123.37	38
3	Zhan WF	Nanjing University	57	35	2036	35.72	27
4	Weng QH	Indiana State University	56	30	6596	117.79	39
5	Göttsche FM	Helmholtz Association	47	8	2730	58.09	27
6	Duan SB	Chinese Academy of Agricultural Sciences	42	25	1703	40.55	23
7	Trigo IF	University of Lisbon	38	6	3059	80.5	21
8	Leng P	Chinese Academy of Agricultural Sciences	38	15	998	26.26	15
9	Liang SL	University of Maryland	37	12	1885	50.95	24
10	Wu H	Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research	36	10	2825	78.47	18

注：*翁齐浩(Weng QH)当前所属机构为香港理工大学；梁顺林(Liang SL)当前所属机构为香港大学。

3.4 载文期刊分析

分析载文期刊能帮助研究者快速准确地找到当前在遥感地表温度研究领域的权威期刊。以SCI

中各期刊收录论文数量排序，表3统计出发文量排名前10的期刊。从表3中可以得知，发文量排名前10的期刊共发表论文2169篇，占总发表数量的

40.19%。Remote Sensing 以 714 篇发文量独居榜首，其次是 Remote Sensing of Environment（362 篇）和 International Journal of Remote Sensing（257 篇）。Remote Sensing 比 Remote Sensing of Environment 多了几乎一倍，这一定程度上与其全开放获取政策有关。期刊的出版国家涵盖了瑞士、美国、英国、荷兰等，美国是多个期刊的出版国，显示了美国在该领域的显著影响力。影响因子 IF（Impact factor）是衡量期刊学术影响力的一个重要指标，

5 年平均 IF（2019—2023）较高的期刊包括 Remote Sensing of Environment（14.5）、ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing（12.4）、Science of the Total Environment（9.6）和 IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing（8.8）。从总被引次数上来看，Remote Sensing of Environment 的总被引次数达到了 38884 次，远远超过其它期刊。表明在 Remote Sensing of Environment 期刊上发表的遥感地表温度文章更容易受到学者的关注。

表 3 1985 年—2023 年遥感地表温度领域排名前 10 出版期刊
Table 3 Top ten journals in the field of remote sensed land surface temperature from 1985 to 2023

排名	出版物标题	发文量/篇	出版国家	总被引次数	5 年平均 IF(2019—2023)
1	Remote Sensing	714	瑞士	15240	5.6
2	Remote Sensing of Environment	362	美国	38884	14.5
3	International Journal of Remote Sensing	257	英国	10200	3.6
4	IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing	157	美国	9474	8.8
5	IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing	142	美国	2583	5.5
6	Journal of Geophysical Research Atmospheres	136	美国	11836	5
7	International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation	114	荷兰	4992	7.2
8	Sustainability	108	瑞士	1093	4
9	Science of the Total Environment	99	荷兰	3539	9.6
10	ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing	88	荷兰	5481	12.4

从最早检索到的年份 1987 年开始，排名前 3 的期刊的发文量随年份变化见图 6，通过其在不同时间的发文数量，可以得到该期刊的活跃度。Remote Sensing 期刊自 2009 年创办以来，发表论文数量呈现快速增长趋势，特别是在 2014 年，发文量大幅增长，并在 2015 年以后远远超过 Remote

Sensing of Environment 和 International Journal of Remote Sensing，处于领先地位。2014 年以前，International Journal of Remote Sensing 和 Remote Sensing of Environment 期刊的发文量交替领先，2014 年之后，后者年发文量领先的年份远远超过前者。

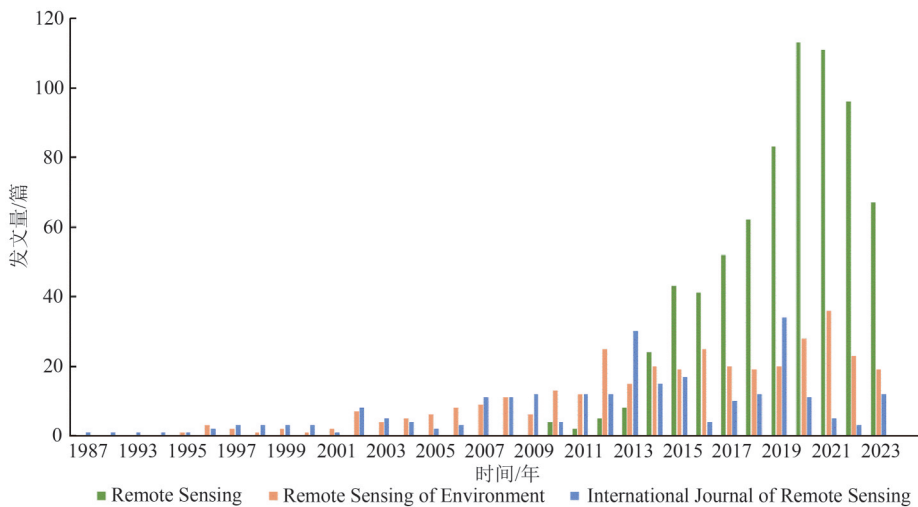


图 6 1985 年—2023 年遥感地表温度领域主要期刊年发文量
Fig. 6 The annual number of papers published in major journals in the field of remote sensed land surface temperature from 1985 to 2023

4 热点发掘及趋势分析

4.1 关键词共现分析

关键词能够提供论文的核心信息，因此关键字分析常用于回顾科学的历史和发展，并确定热点和未来趋势（孙佳佳和李雅静，2022）。为了更好地体现遥感地表温度领域的发展趋势，我们采用了关键词共现分析方法。

本文利用 VOSviewer 软件对遥感地表温度领域的研究文献进行关键词提取统计，获得相关高频关键词 6838 个，最高总频次为 604 次。依据普莱斯计算公式 $M = 0.749 \sqrt{N_{\max}}$ 确定关键词阈值，其中 M 为高频词阈值， $N_{\max}$ 表示表示区间学术论文被

引频次最高值（庞景安，1990）。通过计算可得 M 约为 18。

将频次超过 18 的关键词定义为高频关键词进行研究，统计时在关键词节点中剔除例如“remote sensing”、“land surface temperature”、“satellite”等不包含额外主题信息的非实质性关键词，并对关键词大小写不一致、不规范情况等进行统一处理。

为了更清晰地展示研究主题，以及考虑到卫星和传感器在遥感地表温度研究中的重要作用，我们将卫星和传感器相关的关键词单独提取出来制成表 4，专注于展示与卫星和传感器相关的研究热点和趋势，有助于读者更深入地了解这一领域的技术发展和应用情况。

表 4 卫星/传感器及其高连接强度字段

Table 4 Satellites/Sensors and their high connection strength fields

卫星/传感器关键字段	出现频次	高连接强度关键字段
MODIS	448	validation、evapotranspiration、model、algorithm、soil-moisture、NDVI
Landsat 系列	150	MODIS、vegetation、model、evapotranspiration、city、NDVI、climate、emissivity、index
AVHRR	126	retrieval、MODIS、validation、soil-moisture、downscaling
ASTER	86	vegetation、emissivity、products、MODIS、urban heat island、split-window algorithm、reflection radiometer、validation、cover、retrieval
SMOS	20	validation、soil-moisture、retrieval、model

通过表 4 能够发现，MODIS 数据在遥感地表温度研究中应用最为广泛，其出现频次高达 448 次，显示出其在该领域的核心地位。MODIS 数据具有广泛覆盖范围和较高时间分辨率的特点，能够持续监测全球地表温度的变化，在植被生长状态评估、土地覆盖分类以及农业干旱监测等方面发挥了重要作用。MODIS 数据在模型验证和算法优化方面也发挥了关键的作用，为地表温度反演提供了可靠的数据支持。值得注意的是，Landsat 系列、AVHRR 数据以及 ASTRE 数据的高连接强度关键词中均包含 MODIS，可能是由于 MODIS 地表温度数据的广泛应用，促进了不同数据之间的联合使用。Landsat 系列数据以 150 的出现频次位居第 2，与植被、模型、蒸散、气候、发射率等关键字段联系较高，以其高空间分辨率和长时间序列的数据积累，在植被监测、城市热岛效应以及气候变化等研究中具有显著优势。AVHRR 数据与 Landsat 系列数据的出现频次相近，其数据在反演地表参数和验证其他数据源方面表现出色。ASTER 数据虽

然出现次数相对较少，但是其高连接强度关键词数量最多，由此反映了其应用领域的广泛性，诸如，其在城市热岛效应、植被覆盖以及地表参数反演等方面具有独特优势。相比之下，SMOS 卫星数据的应用范围较窄，出现频次仅为 20 次，但显示出其在土壤湿度监测方面的专业性和重要性。

从关键词聚类图谱中剔除与传感器或卫星直接相关的关键词之后，将数据导入 VOSviewer 软件，并借助其基于关联强度的算法，依据关键词间的共现关系强度，形成了 4 个紧密的聚类。最终制成的关键词聚类图谱见图 7。

图 7 中，圆节点的大小反映关键词出现的频次，节点越大表示该关键词在该领域内出现的次数越多，从而更能代表该领域的热点。节点之间的连线代表关键词之间的关联强度，连线越粗则表示这两个关键词共同出现在同一篇文献中的频率越高，表明它们之间的关联越紧密。同时，不同的颜色代表不同的研究主题的集群。关键词集群可以总结为以下 4 个主流主题集群。



图8 1985 年—2023 年遥感地表温度领域排名前 25 爆发词
Fig. 8 Top 25 explosive words in the field of remote sensed land surface temperature from 1985 to 2023

(1) 从数据来源来看，早在 1992 年，NOAA 系列卫星搭载的 AVHRR 传感器（甚高分辨率扫描辐射计）成为主要的热红外遥感数据源，其爆发区间持续到 2015 年，为遥感地表温度的研究提供了大量数据。随着遥感技术的不断进步，在 2009 年—2018 期间，Terra/Aqua 卫星上搭载的 MODIS（中分辨率成像光谱仪）逐渐崭露头角。与 AVHRR 传感器相比，MODIS 具有更高的空间分辨率和光谱分辨率，能够提供更加精准的地球观测数据，因此学者能够更精确地研究遥感地表温度的变化规律、影响因素以及与气候变化之间的联系。在 2014 年—2018 年期间，Landsat 上搭载的 TM 传感器（专题制图仪）成为主要数据源。

这些主流热红外遥感数据主要应用于植被生长状态评估、农业干旱监测、土壤湿度监测、城市热岛、气候变化等领域。而不同传感器之间应用也有所差异。例如，Landsat 数据在田块尺度农业应用研究、城市热环境研究中占据主导地位，

这与其较高的空间分辨率有关；而逐日 MODIS 数据因其较多的谱段信息和中等分辨率，被广泛应用于全球尺度的蒸散发、气候变化等综合研究，也常与其他传感器数据联合使用。

值得注意的是，图 8 所展现的为当前时期的爆发词，而国产风云、高分以及欧空局的 Sentinel 等遥感数据近年来也进行了全球推广，鉴于其强大的应用价值和广泛的影响力，这些数据在未来一段时间内很有可能成为爆发词，未来研究可能会更加注重不同数据源的集成利用，以提高空间分辨率和时间分辨率。

(2) 从遥感地表温度研究领域来看，关键词的涌现和变化揭示了该领域的研究重点和方向。据统计，早在 1992 年，大气校正（atmosphere correction）成为当时研究的热点词汇，这标志着遥感技术在气象学领域的应用逐渐受到重视。随后，土壤、光谱融合、植被指数、热通量、含水量等关键词在 21 世纪初开始大量爆发，这些关键

词的活跃体现了遥感技术在研究地表温度与植被、土壤等自然要素之间的关系方面得到的广泛应用。2020年—2023年期间,观察到 machine learning、green space、google earth engine、local climate zone 等关键词在学术界大量爆发。这一时期,机器学习得到了广泛应用。随着人工智能和机器学习技术的发展,遥感技术也朝向智能化方向发展,研究效率与精度不断提高,逐渐成为该领域学者开展研究的重要助力。与此同时,受遥感大数据对持续扩张的空间规模和高处理效率的要求,google earth engine 作为全球尺度遥感影像可视化计算与分析处理的云平台,已被越来越多的学者所使用,发挥着重要的作用。此外,随着城市化进程的加速,城市气候与环境质量的问题受到越来越多重视,学者对 local climate zone 等城市热岛相关方法的关注度也持续上升,扩展绿色空间也逐渐成为研究的重点,充分说明在城市化快速发展的背景下,热红外遥感技术的应用也越来越注重与城市

生态环境的融合。

4.3 热点研究及变化分析

在检索的 5336 篇文献中以 “TI=(inversion or retriev* or estimat* or determination) OR AK=(inversion or retriev* or estimat* or determination)”、“TI=(validation) OR AK=(validation)”、“TI=(reconstruct* or gap-filling) OR AK=(reconstruct* or gap-filling)”、“TI=(fusion) OR AK=(fusion)”、“TI=(normalization or anisotropy or consistent) OR AK=(normalization or anisotropy or consistent)”、“TI=(downscaling or disaggregation or sharpening) OR AK=(downscaling or disaggregation or sharpening)”依次检索反演、验证、重建、时空融合、归一化、降尺度 6 个遥感地表温度主要研究方向,检索所得各方向年发文量如图 9 所示。整体来看,这 6 个方向都呈现出增长的态势,然而,它们的变化速度和趋势存在一定的差异。

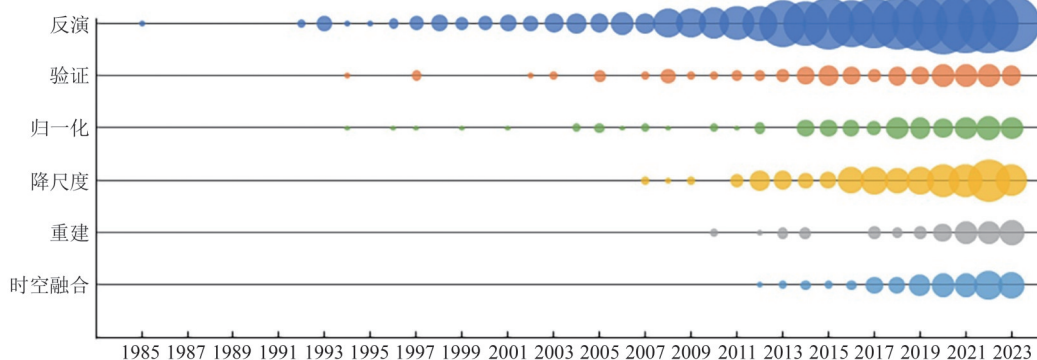


图9 1985年—2023年遥感地表温度领域主要基础研究方向气泡图

Fig. 9 Bubble map of the main basic research directions in the field of remote sensed land surface temperature from 1985 to 2023

观察图9可知反演相关的研究最先出现,其后验证与归一化在1994年首次出现,降尺度、重建和时空融合相关研究随后依次出现。遥感地表温度反演作为获取地表温度数据的关键技术之一,在早期阶段研究数量稳步增长,明显超过其他方向。然而,近期反演方向发文量的增长速度有所放缓,这可能是由于反演算法和技术的成熟度已经相对较高,导致研究速度逐渐减慢。验证作为反映反演结果准确性和可靠性的手段(Yu等, 2019),其研究数量在图中呈现出先增长后稳定的趋势,与反演近乎一致。此外,由于遥感反演技术的日益成熟,越来越多的遥感地表温度产品被

发布与应用;而热红外传感器无法穿透云雾的局限导致热红外地表温度产品存在大量缺失值(何坤龙等, 2021),故在对地观测与信息处理技术快速发展的推动下,遥感地表温度信息重建逐渐成为重点研究方向。

降尺度和时空融合方向的研究数量在近年来则呈现出快速增长的趋势,其中,时空融合增长速度最快。降尺度一般面临更高分辨率上信息不足的问题,常通过引入额外信息构造趋势面才能实现降尺度转换,有学者对遥感地表温度降尺度的概念、范式、理论、方法、框架和应用等方面进行了深入探索(Zhan等, 2013);而时空融合通

过融合不同时间分辨率、不同空间分辨率的多源数据,实现遥感地表温度在时、空分辨率上的提升,逐渐成为当下研究的主流。从本质上来说,时空融合可以看作是一种特殊的降尺度方法(Wu等,2021);但由于近年来时空融合的快速发展,故本文将单独列为一个研究方向。此外,由于遥感观测的地表温度是一个特定角度的瞬时值,往往无法直接满足研究者对其他观测条件的地表温度的需求。同时,遥感地表温度随观测时间、观测角度快速变化,这也增加了多源地表温度数据对比、重建、融合以及长时序应用分析的难度。因此,温度日变化DTC(Diurnal Temperature Cycle)(Hong等,2018)、温度年变化ATC(Annual

Temperature Cycle)(Zou等,2018)、热方向性(Cao等,2019)等模型的研究应运而生,使得遥感地表温度归一化研究呈现稳步增长的态势。

综上所述,遥感地表温度研究各个基础研究方向的文献数量随时间的变化趋势各异,但总体上呈现出增长的态势。这反映了遥感地表温度基础研究领域的不断发展和进步,以及在遥感科学与技术一级学科中的重要地位和应用前景。

除上述遥感地表温度基础研究之外,检索的5336篇文献中也存在大量遥感地表温度应用研究方向,其主要聚焦于城市热岛、农业监测、气候变化和灾害监测4个主要应用领域,检索得各方向每两年发文数量如图10所示。

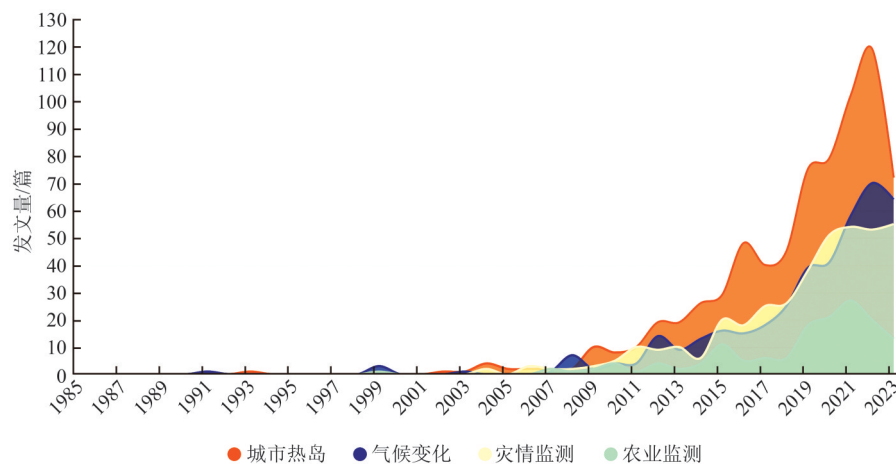


图10 1985年—2023年遥感地表温度领域主要应用研究方向面积图

Fig. 10 Area of major applied research directions in the field of remote sensed land surface temperature from 1985 to 2023

城市热岛作为地表温度应用研究的重要领域之一,其研究数量位居首位,总体增长速度最快。利用遥感地表温度进行城市热岛的研究自1993年首次出现,并在进入2000年后呈现出显著的持续增长态势。这主要得益于城市化进程的加速以及城市热岛对环境和人类生活带来的日益显著的影响。目前已有越来越多的学者开始关注城市热岛的形成机制、时空分布及其对城市气候、能源利用等方面的影响。

气候变化和灾情监测两大领域的研究在整体上均呈现稳步增长,尽管研究总量上十分接近,但增长趋势各有不同。气候变化领域研究在2013年前呈现波动式增长,之后逐步进入稳步增长阶段。面对全球气候变化问题的严峻挑战,遥感地表温度成为监测和评估气候变化的重要手段之一。学

者们通过利用遥感数据,分析地表温度的变化趋势和规律,为应对气候变化提供科学依据。相对而言,灾情监测领域的研究更为稳定,尽管在2014年出现较为明显的减少,但整体上仍保持着稳步增长的趋势。遥感地表温度在灾害预警、应急响应等方面发挥着重要作用,为减少灾害损失、保障人民生命财产安全提供了有力支持。

农业监测领域的研究虽然初期数量相对较少,但随着时间的推移,其增长趋势日益显著。在相关部门的推动下,遥感农业监测近几十年来迅速发展,已成为一个重要的学术领域。遥感技术在农业领域有着广泛的应用前景,尤其是在作物生长监测、农田水分管理和干旱预警等方面具有很大潜力。

5 结 语

5.1 结论

本文通过文献计量的方法回顾1985年—2023年间遥感地表温度研究的现状和发展趋势,从论文产出、合作关系、作者分布和期刊分析等视角得到遥感地表温度研究领域相关文献基本特征,并结合研究热点分析其未来发展前景。得出以下主要结论:

(1) 在文献的基本特征方面:1985年—2023年间,遥感地表温度研究经历了迅猛发展,特别是在2005年以后呈现飞速增长的趋势。近十年来,随着国家对生态环境领域的日益重视,遥感地表温度在环境生态学科的发文量超过了遥感学科。在遥感地表温度领域,中国、美国的国际影响力尤为突出。中国在该领域的主要合作国家包括美国 and 欧洲,而和印度以及德国的合作有待进一步加强。中国科学院在该领域的科研实力极强,中国学者不论是发文数还是篇被引次数均较高,为该领域做出了卓越贡献,展现出较大的国际影响力。

(2) 从数据源来看:AVHRR数据较早被广泛使用,主要用于监测云和测量地表热辐射,而后使用MODIS传感器较多,其具有高时间分辨率和多光谱波段,能够提供较为全面的地表温度信息,因此也是遥感地表温度最常用的数据来源。尽管ASTER的使用频率相对较低,但其具有广泛的适用性。而Landsat 8卫星发射,进一步推动了Landsat系列数据的广泛使用。随着新卫星的不断发射,遥感数据源也变得多样,会更加注重对多源数据的集成利用。

(3) 从研究方向来看:遥感地表温度基础研究主要包括反演、验证、重建、降尺度、融合、归一化及应用等大的方向。早期反演和验证占据主要研究方向,归一化呈现稳步增长趋势,降尺度和时空融合成为近十年遥感地表温度的研究热点。从应用研究来看,城市热岛、农业监测、气候变化和灾害监测是主要应用领域。其中,城市热岛作为遥感地表温度的一个核心应用方向,持续吸引着众多学者的关注和研究,仍保持着较快的增长势头。

5.2 展望

(1) 多模态地表温度数据的融合。单一模式的数据往往侧重于特定模态与任务的建模,限制了其在海量数据中的泛化能力。随着地表温度数据的多样化,多模态地表温度数据的融合成为了一个重要的研究方向。通过融合来自不同模态的信息,可以更好地理解和分析地表特征(Li等, 2023),在多样化的任务重展现出优异的性能。多模态地表温度数据融合涉及到不同分辨率以及不同时间尺度的数据融合,例如热红外和微波数据、模式数据与热红外数据、无人机数据和卫星数据、站点数据和卫星数据。如何融合来自不同模态的信息,更好地实现数据互补是未来研究的一个重要思路。

(2) 机理模型与学习模型的耦合。近年来,以深度学习为主的学习模型推动着遥感朝着人工智能方向不断发展,通过训练高效的人工智能网络模型,可以实现对遥感地表温度的高精度估算,并实时监测和动态分析地表温度的变化。为了使人工智能的应用性更广,机理模型与学习模型的耦合正逐渐成为各学科领域的研究热点(沈焕锋和张良培, 2023)。未来的一段时间,遥感地表温度研究将进一步结合深度学习推动更加深入的应用,呈现出更加广阔的前景(毛克彪等, 2023b)。

(3) 精细化尺度研究。遥感地表温度精细尺度研究也很可能成为一个重点研究方向。在空间维度上,从城市热岛到街道热岛研究的深化,更细致地揭示不同地理单元中的热岛现象及其差异;在时间维度上,从季节性分析到逐日、逐时的地表温度状况的精准观测,捕捉热岛效应的动态变化及不同气候条件下的特征。此外,大尺度和长时间序列的精细研究将成为焦点(Li等, 2023),从而进一步推动更深层次的应用。

不可否认,本研究也存在一些不足之处:首先,在选择数据库时,只选择了国际通用数据库WoS,而未包含中文数据库,可能导致部分高质量的中文文章被遗漏,从而影响研究的全面性。其次,在确定相关检索式时,虽然尽力思考周全,但难免存在一定的误差,检索结果可能没有完全覆盖;如早期部分文献由于在surface temperature前没有land而未被检索到;同时,一篇文章可能包含多个相关关键词,例如“反演”和“验证”

往往同时出现, 在各个研究热点方向的归纳时, 需要人为干预, 存在一定的主观性。最后, 受篇幅限制, 本文并未展开对文章的引文分析, 其对深入挖掘文献之间的内在联系和影响具有重要意义, 这是今后可以进一步探讨研究的问题。

参考文献(References)

- Cao B, Liu Q H, Du Y M, Roujean J L, Gastellu-Etchegorry J P, Trigo I F, Zhan W F, Yu Y Y, Cheng J, Jacob F, Lagouarde J P, Bian Z J, Li H, Hu T and Xiao Q. 2019. A review of earth surface thermal radiation directionality observing and modeling: historical development, current status and perspectives. *Remote Sensing of Environment*, 232: 111304 [DOI: 10.1016/j.rse.2019.111304]
- Chen C M. 2006. CiteSpace II: detecting and visualizing emerging trends and transient patterns in scientific literature. *Journal of the American Society for information Science and Technology*, 57(3): 359-377 [DOI: 10.1002/asi.20317]
- Ding L R, Zhou J, Zhang X D, Wang S F, Tang W B, Wang Z W, Ma J, Ai L J, Li M S and Wang W. 2023. Estimation of all-weather land surface temperature with remote sensing: progress and challenges. *National Remote Sensing Bulletin*, 27(7): 1534-1553 (丁利荣, 周纪, 张晓东, 王韶飞, 唐文彬, 王子卫, 马晋, 艾丽皎, 李明松, 王伟. 2023. 全天候地表温度遥感获取进展与挑战. *遥感学报*, 27(7): 1534-1553) [DOI: 10.11834/jrs.20211323]
- Duan S B, Li Z L and Leng P. 2017. A framework for the retrieval of all-weather land surface temperature at a high spatial resolution from polar-orbiting thermal infrared and passive microwave data. *Remote Sensing of Environment*, 195: 107-117. [DOI: 10.1016/j.rse.2017.04.008]
- Duan S B, Ru C, Li Z L, Wang M M, Xu H Q, Li H, Wu P H, Zhan W F, Zhou J, Zhao W, Ren H Z, Wu H, Tang B H, Zhang X, Shang G F and Qin Z H. 2021. Reviews of methods for land surface temperature retrieval from Landsat thermal infrared data. *National Remote Sensing Bulletin*, 25(8): 1591-1617 (段四波, 茹晨, 李召良, 王猛猛, 徐涵秋, 历华, 吴鹏海, 占文凤, 周纪, 赵伟, 任华忠, 吴骅, 唐伯惠, 张霞, 尚国珪, 覃志豪. 2021. Landsat 卫星热红外数据地表温度遥感反演研究进展. *遥感学报*, 25(8): 1591-1617) [DOI: 10.11834/jrs.20211296]
- Ebrahim S A, Poshtan J, Jamali S M and Ebrahim N A. 2020. Quantitative and qualitative analysis of time-series classification using deep learning. *IEEE Access*, 8: 90202-90215 [DOI: 10.1109/ACCESS.2020.2993538]
- Feng Y and Zheng J W. 2005. An analysis of status and trends of the international remote sensing science on bibliometrics. *Remote Sensing Technology and Application*, 20(5): 526-530 (冯筠, 郑军卫. 2005. 基于文献计量学的国际遥感学科发展态势分析. *遥感技术与应用*, 20(5): 526-530) [DOI: 10.3969/j.issn.1004-0323.2005.05.014]
- Garfield E. 1955. Citation indexes for science: a new dimension in documentation through association of ideas. *Science*, 122(3159): 108-111 [DOI: 10.1126/science.122.3159.108]
- Hansen J, Ruedy R, Sato M and Lo K. 2010. Global surface temperature change. *Reviews of Geophysics*, 48(4): RG4004 [DOI: 10.1029/2010RG000345]
- He K L, Zhao W, Liu X H and Liu J. 2021. Sensitivity analysis of the training set to the performance of the machine learning-based land surface temperature reconstruction for cloud covered pixels. *National Remote Sensing Bulletin*, 25(8): 1722-1734 (何坤龙, 赵伟, 刘晓辉, 刘蛟. 2021. 云雾覆盖下地表温度重建机器学习模型的训练集敏感性分析. *遥感学报*, 25(8): 1722-1734) [DOI: 10.11834/jrs.20211236]
- Hong F L, Zhan W F, Goettsche F M, Liu Z H, Zhou J, Huang F, Lai J M and Li M C. 2018. Comprehensive assessment of four-parameter diurnal land surface temperature cycle models under clear-sky. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 142: 190-204. [DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2018.06.008]
- Huang M R, Jian H D, Xu C, Hao J S, Yan J, Liu L Y, Fan X T and Guo H D. 2023. Bibliometrics spatial-temporal evolution analysis of the development of remote sensing. *National Remote Sensing Bulletin*, 27(11): 2449-2466 (黄铭瑞, 简洪登, 徐琛, 郝俊生, 闫珺, 刘良云, 范湘涛, 郭华东. 2023. 基于文献计量的遥感学科发展趋势分析. *遥感学报*, 27(11): 2449-2466) [DOI: 10.11834/jrs.20232659]
- Jia A L, Liang S L, Wang D D, Ma L, Wang Z H and Xu S. 2023. Global hourly, 5 km, all-sky land surface temperature data from 2011 to 2021 based on integrating geostationary and polar-orbiting satellite data. *Earth System Science Data*, 15(2): 869-895 [DOI: 10.5194/essd-15-869-2023]
- Li R, Wang M M, Zhang Z J, Hu T and Liu X G. 2022. A review of spatiotemporal fusion methods for remotely sensed land surface temperature. *National Remote Sensing Bulletin*, 26(12): 2433-2450 (李冉, 王猛猛, 张正加, 胡添, 刘修国. 2022. 遥感地表温度产品时空融合方法研究综述. *遥感学报*, 26(12): 2433-2450) [DOI: 10.11834/jrs.20210294]
- Li Z L, Duan S B, Tang B H, Wu H, Ren H Z, Yan G J, Tang R L and Leng P. 2016. Review of methods for land surface temperature derived from thermal infrared remotely sensed data. *Journal of Remote Sensing (in Chinese)*, 20(5): 899-920 (李召良, 段四波, 唐伯惠, 吴骅, 任华忠, 阎广建, 唐荣林, 冷佩. 2016. 热红外地表温度遥感反演方法研究进展. *遥感学报*, 20(5): 899-920) [DOI: 10.11834/jrs.20166192]
- Li Z L, Tang B H, Wu H, Ren H Z, Yan G J, Wan Z M, Trigo I F and Sobrino J A. 2013. Satellite-derived land surface temperature: current status and perspectives. *Remote Sensing of Environment*,

- 131: 14-37 [DOI: 10.1016/j.rse.2012.12.008]
- Li Z L, Wu H, Duan S B, Zhao W, Ren H Z, Liu X Y, Leng P, Tang R L, Ye X, Zhu J S, Sun Y W, Si M L, Liu M, Li J H, Zhang X, Shang G F, Tang B H, Yan G J and Zhou C H. 2023. Satellite remote sensing of global land surface temperature: definition, methods, products, and applications. *Reviews of Geophysics*, 61(1): e2022RG000777 [DOI: 10.1029/2022rg000777]
- Liu X M, Zhao J and Xu J M. 2021. Research on immobilization of heavy metals in contaminated agricultural soils—bibliometric analysis based on web of science database. *Acta Pedologica Sinica*, 58(2): 445-455. (刘杏梅, 赵健, 徐建明. 2021. 污染农田土壤的重金属钝化技术研究——基于Web of Science数据库的计量分析. *土壤学报*, 58(2): 445-455) [DOI: 10.11766/trxb202005060098]
- Ma J, Zhou J, Götsche F M, Liang S L, Wang S F and Li M S. 2020. A global long-term (1981-2000) land surface temperature product for NOAA AVHRR. *Earth System Science Data*, 12(4): 3247-3268 [DOI: 10.5194/essd-12-3247-2020]
- Mao K B, Yuan Z J, Shi J C, Wu S L, Hu D Y, Che J and Dong L X. 2023a. Theory and engineering technology implementation of artificial intelligence retrieval paradigm for parameters of remote sensing based on big data. *Journal of Agricultural Big Data*, 5(4): 1-12 (毛克彪, 袁紫晋, 施建成, 武胜利, 胡德勇, 车进, 董立新. 2023a. 基于大数据的遥感参数人工智能反演范式理论形成与工程技术实现. *农业大数据学报*, 5(4): 1-12) [DOI: 10.19788/j.issn.2096-6369.230401]
- Mao K B, Zhang C Y, Shi J C, Wang X M, Guo Z H, Li C S, Dong L X, Wu M X, Sun R J, Wu S L, Ji D B, Jiang L M, Zhao T J, Qiu Y B, Du Y M and Xu T R. 2023b. The paradigm theory and judgment conditions of geophysical parameter retrieval based on artificial intelligence. *Smart Agriculture*, 5(2): 161-171 (毛克彪, 张晨阳, 施建成, 王旭明, 郭中华, 李春树, 董立新, 吴门新, 孙瑞静, 武胜利, 姬大彬, 蒋玲梅, 赵天杰, 邱玉宝, 杜永明, 徐同仁. 2023b. 基于人工智能的地球物理参数反演范式理论及判定条件. *智慧农业(中英文)*, 5(2): 161-171) [DOI: 10.12133/j.smartag.SA202304013]
- Mo Y P, Xu Y M, Chen H J and Zhu S Y. 2021. A review of reconstructing remotely sensed land surface temperature under cloudy conditions. *Remote Sensing*, 13(14): 2838. [DOI: 10.3390/rs13142838]
- Pang J A. 1990. Application and Verification of Beta-Negative Binomial Distribution (BNBD). *Journal of the China Society for Scientific and Technical Information*, 1990, 9(3): 193-202. (庞景安. 1990. 贝塔—负二项分布(BNBD)的应用与验证. *情报学报*, 1990, 9(3): 193-202) [DOI: 10.3772/j.issn.1000-0135.1990.03.005]
- Qin Z H, Gao M F, Qin X M, Li W J, Xu B. 2005. Methodology to retrieve land surface temperature from MODIS data for agricultural drought monitoring in China. *Journal of Natural Disasters*, 14(4): 64-71 (覃志豪, 高懋芳, 秦晓敏, 李文娟, 徐斌. 2005. 农业旱灾监测中的地表温度遥感反演方法——以MODIS数据为例. *自然灾害学报*, 14(4): 64-71) [DOI: 10.3969/j.issn.1004-4574.2005.04.011]
- Qiu J P and Wang M Z. 2010. The analysis of the digital library research paper in China from the years of 1999 to 2008. *Journal of Intelligence*, 29(2): 1-5 (邱均平, 王明芝. 2010. 1999—2008年国内数字图书馆研究论文的计量分析. *情报杂志*, 29(2): 1-5) [DOI: 10.3969/j.issn.1002-1965.2010.02.001]
- Shen H F and Zhang L P. 2023. Mechanism-learning coupling paradigms for parameter inversion and simulation in earth surface systems. *Science China Earth Sciences*, 66(3): 568-582 (沈焕锋, 张良培. 2023. 地球表层特征参量反演与模拟的机理—学习耦合范式. *中国科学: 地球科学*, 53(3): 546-560) [DOI: 10.1360/SSTe-2022-0089]
- Sun J J and Li Y J. 2022. Recognition of high-value hot topics based on value segmentation of keywords. *Journal of the China Society for Scientific and Technical Information*, 41(2): 118-129 (孙佳佳, 李雅静. 2022. 基于关键词价值细分的高价值热点主题识别方法研究. *情报学报*, 41(2): 118-129) [DOI: 10.3772/j.issn.1000-0135.2022.02.002]
- Sun W W, Liu W W, Wang Y M, Zhao R, Huang M Z, Wang Y, Yang G and Meng X C. 2023. Research progress and prospects of hyperspectral remote sensing for global wetland from 2010 to 2022. *National Remote Sensing Bulletin*, 27(6): 1281-1299 (孙伟伟, 刘围围, 王煜森, 赵锐, 黄明珠, 王耀, 杨刚, 孟祥超. 2023. 2010年—2022年全球湿地高光谱遥感研究进展与展望. *遥感学报*, 27(6): 1281-1299) [DOI: 10.11834/jrs.20232620]
- Tang W B, Zhou J, Ma J, Wang Z W, Ding L R, Zhang X D and Zhang X. 2024. TRIMS LST: a daily 1 km all-weather land surface temperature dataset for China's landmass and surrounding areas (2000-2022). *Earth System Science Data*, 16(1): 387-419 [DOI: 10.5194/essd-16-387-2024]
- Tomlinson C J, Chapman L, Thornes J E and Baker C. 2011. Remote sensing land surface temperature for meteorology and climatology: a review. *Meteorological Applications*, 18(3): 296-306. [DOI: 10.1002/met.287]
- van Eck N J and Waltman L. 2010. Software survey: VOSviewer, a computer program for bibliometric mapping. *Scientometrics*, 84(2): 523-538 [DOI: 10.1007/s11192-009-0146-3]
- Wan Z M. 2013. Collection-6 MODIS land surface temperature products users' guide. University of California, Santa Barbara Weng Q H. 2009. Thermal infrared remote sensing for urban climate and environmental studies: methods, applications, and trends. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 64(4): 335-344 [DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2009.03.007]
- Wu H, Li X J, Li Z L, Duan S B and Qian Y G. 2021. Hyperspectral thermal infrared remote sensing: current status and perspectives. *National Remote Sensing Bulletin*, 25(8): 1567-1590 (吴骅, 李秀

- 娟, 李召良, 段四波, 钱永刚. 2021. 高光谱热红外遥感: 现状与展望. 遥感学报, 25(8): 1567-1590 [DOI: 10.11834/jrs.20211306]
- Wu P H, Su Y, Duan S B, Li X H, Yang H, Zeng C, Ma X S, Wu Y L and Shen H F. 2022. A two-step deep learning framework for mapping gapless all-weather land surface temperature using thermal infrared and passive microwave data. Remote Sensing of Environment, 277: 113070 [DOI: 10.1016/j.rse.2022.113070]
- Wu P H, Yin Z X, Zeng C, Duan S B, Gottsche F M, Ma X S, Li X H, Yang H and Shen H F. 2021. Spatially continuous and high-resolution land surface temperature product generation: a review of reconstruction and spatiotemporal fusion techniques. IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine, 9(3): 112-137 [DOI: 10.1109/MGRS.2021.3050782]
- Xiong J H, Wu H, Gao Y, Cai S, Liang D and Yu W P. 2023. Ten years of remote sensing science: NSFC program fundings, progress and challenges. National Remote Sensing Bulletin, 27(4): 821-830 (熊巨华, 吴浩, 高阳, 蔡顺, 梁丹, 于文凭. 2023. 遥感科学十年: 自然科学基金项目申报资助、研究成果与发展挑战. 遥感学报, 27(4): 821-830) [DOI: 10.11834/jrs.20232644]
- Xu H Q. 2013. A remote sensing index for assessment of regional ecological changes. China Environmental Science, 33(5): 889-897 (徐涵秋. 2013. 区域生态环境变化的遥感评价指数. 中国环境科学, 33(5): 889-897) [DOI: 10.3969/j.issn.1000-6923.2013.05.019]
- Xu N, Guo X D, Hong Y T, Zhang C and Dong H. 2008. Study on land degradation assessment indicators based on literature analysis. Scientia Geographica Sinica, 28(3): 425-430 (许宁, 郭旭东, 洪友堂, 张聪, 董华. 2008. 基于文献分析的土地退化评价指标研究. 地理科学, 28(3): 425-430) [DOI: 10.3969/j.issn.1000-0690.2008.03.022]
- Xu S and Cheng J. 2021. A new land surface temperature fusion strategy based on cumulative distribution function matching and multi-resolution Kalman filtering. Remote Sensing of Environment, 254: 112256 [DOI: 10.1016/j.rse.2020.112256]
- Xu X R, Liu Q H and Chen J Y. 1998. The remote sensing of land surface temperature. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 34(2/3): 116-121 (徐希甯, 柳钦火, 陈家宜. 1998. 遥感地面温度. 北京大学学报(自然科学版), 34(2/3): 116-121)
- Yu W P, Ma M G, Yang H, Tan J L and Li X L. 2019. Supplement of the radiance-based method to validate satellite-derived land surface temperature products over heterogeneous land surfaces. Remote Sensing of Environment, 230: 111188. [DOI: 10.1016/j.rse.2019.05.007]
- Zhan W F, Chen Y H, Zhou J, Wang J F, Liu W Y, Voogt J, Zhu X L, Quan J L and Li J. 2013. Disaggregation of remotely sensed land surface temperature: literature survey, taxonomy, issues, and caveats. Remote Sensing of Environment, 131: 119-139, [DOI: 10.1016/j.rse.2012.12.014]
- Zhao W, Xiong D H, Wen F P and Wang X D. 2020. Lake area monitoring based on land surface temperature in the Tibetan Plateau from 2000 to 2018. Environmental Research Letters, 15(8): 084033. [DOI: 10.1088/1748-9326/ab9b41]
- Zheng Q, Li P Y and Zhou D. 2023. Current status and trend of studying smart agriculture based on bibliometric analysis. Journal of Huazhong Agricultural University, 42(3): 29-38 (郑倩, 李鹏云, 周迪. 2023. 基于文献计量学的智慧农业研究现状及趋势分析. 华中农业大学学报, 42(3): 29-38) [DOI: 10.13300/j.cnki.hnlkxb.2023.03.004]
- Zhu J S, Ren H Z, Ye X, Zeng H, Nie J, Jiang C C and Guo J X. 2021. Ground validation of land surface temperature and surface emissivity from thermal infrared remote sensing data. National Remote Sensing Bulletin, 25(8): 1538-1566 (朱金顺, 任华忠, 叶昕, 曾晖, 聂婧, 蒋晨琛, 郭金鑫. 2021. 热红外遥感地表温度与发射率地面验证进展. 遥感学报, 25(8): 1538-1566) [DOI: 10.11834/jrs.20211299]
- Zou Z X, Zhan W F, Liu Z H, Bechtel B, Gao L, Hong F L, Huang F and Lai J M. 2018. Enhanced modeling of annual temperature cycles with temporally discrete remotely sensed thermal observations. Remote Sensing, 10(4): 650 [DOI: 10.3390/rs10040650]

Research progress and prospects of remotely sensed land surface temperature from 1985 to 2023

LIU Chun¹, BAO Wenhui¹, WU Hua³, DUAN Sibao⁴, CAO Biao², YIN Zhixiang¹, WU Penghai^{1,2,5}

1. College of Resources and Environmental Engineering, Anhui University, Hefei 230601;

2. State Key Laboratory of Remote Sensing Science, Beijing 100101;

3. Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101;

4. Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081;

5. Information Materials and Intelligent Sensing Laboratory of Anhui Province, Anhui University, Hefei 230601

Abstract: Land Surface Temperature (LST), which determines the radiation and energy exchange at the surface, is one of the key

parameters in the physical processes of the ground surface. It has been widely used in numerical forecasting, agricultural situation estimation, disaster monitoring, ecological environment assessment, and many other aspects. With the development of remote sensing technology, the study of LST based on remote sensing has received extensive attention from scholars at home and abroad.

In this paper, based on the core database of Web of Science, we used VOSviewer and CiteSpace software to conduct a bibliometric study on 5336 papers on remote sensing-derived LST from 1985 to 2023. We analyzed the number of papers, research institutions, countries, authors, issuing journals, and keywords and looked forward to the future trend by combining with the hot spots of current research.

Results show that (1) the field of remote sensing-derived LST has experienced rapid growth, especially after 2012, showing exponential expansion. China and the United States have made particularly outstanding contributions to this field, with 2169 and 1422 papers respectively. Chinese scholars have played a pivotal role in the field of remote sensing-derived LST, and the Chinese Academy of Sciences has achieved remarkable results. The organizations have shown a close cooperation between institutions, presenting an internationalized research pattern that promotes the sharing of scientific research resources and dissemination of knowledge worldwide. (2) Over time, the research center in the field of remote sensing-derived LST still focuses on the basic disciplines and gradually shifts to the applied disciplines. In terms of journals, Remote Sensing has become the main journal in the field of remote sensing-derived LST with its all-open-source feature, and Remote Sensing of Environment leads in popularity with a high citation count of 38884, underscoring its academic influence. (3) By clustering the keywords, four mainstream clusters are identified. LST data from sources like AVHRR, MODIS, and Landsat are extensively utilized, marking a shift in research focus from traditional topics like vegetation index and soil to emerging domains such as machine learning and local climate zones. This evolution is characterized by ongoing innovation and development in technological methods and research content. In the past decade, in addition to the traditional research directions of inversion, validation, and normalization of remotely sensed surface temperature, reconstruction, downscaling, and spatiotemporal fusion have become emerging research hotspots in the field.

Key words: remote sensing, land surface temperature, bibliometrics, research hotspots, development trends, fields of application, satellite data

Supported by National Natural Science Foundation of China (No. 42271381); Open Fund of State Key Laboratory of Remote Sensing Science (No. OFSLRSS202205)