

DOI:10.11913/PSJ.2095-0837.2022.60751

潘智鹏, 严雪, 刘帆, 鲜玲. 基于文献计量学的冻土植被研究进展[J]. 植物科学学报, 2022, 40(6): 751-761

Pan ZP, Yan X, Liu F, Xian L. Progress in permafrost vegetation research based on bibliometrics[J]. *Plant Science Journal*, 2022, 40(6): 751-761

基于文献计量学的冻土植被研究进展

潘智鹏^{1,2}, 严雪², 刘帆^{2*}, 鲜玲²

(1. 西藏大学理学院, 拉萨 850000; 2. 中国科学院武汉植物园, 武汉 430074)

摘要: 本研究利用文献计量学方法统计分析了 1985 – 2021 年由 Web of Science 核心数据库收录的全球 2867 篇(其中青藏高原 157 篇)冻土植被研究的相关文献。结果显示, 研究论文数量逐年增加, 青藏高原文献数量年增长率(19.94%)高于全球研究文献(13.76%)。遥感技术、模型算法等研究技术也被大量应用。拥有冻土的国家贡献了 57.55% 的独立研究, 同时国际合作文献数量逐年递增。全球冻土植被研究的重点在于估算冻土融化导致的碳排放以及冻土地区植物在固碳中的作用, 而青藏高原的研究重点独立于全球热点, 主要集中在冻土地区植被和生态系统的退化。预测在未来冻土植被研究中, 全球研究主要关注碳循环, 而青藏高原的研究则关注退化过程。青藏高原独树一帜的研究方向可为全球冻土植被研究带来独特的视角, 青藏高原地区也必将成为全球冻土植被最重要的研究区域之一。

关键词: 永久冻土; 青藏高原; 植被; 气候变化

中图分类号: Q948.2

文献标识码: A

文章编号: 2095-0837(2022)06-0751-11

Progress in permafrost vegetation research based on bibliometrics

Pan Zhi-Peng^{1,2}, Yan Xue², Liu Fan^{2*}, Xian Ling²

(1. College of Science, Tibet University, Lhasa 850000, China; 2. Wuhan Botanical Garden, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430074, China)

Abstract: In the current study, we used bibliometric methods to count permafrost vegetation studies at the global (2867) and Qinghai-Tibet Plateau scales (157) from the Web of Science core database from 1985 to 2021. Permafrost vegetation research has grown year by year, with increasing use of remote sensing technology and model algorithms. Those countries with permafrost showed the highest contribution to the literature. The number of cooperative studies among countries has increased year by year, higher than the number of independent studies. In general, global permafrost vegetation studies have focused on carbon emission estimations under permafrost melting and carbon sequestration by plants, while studies on the Qinghai-Tibet Plateau have focused on the degradation of vegetation and ecosystems in permafrost regions. Given the high diversity of ecosystems on the Qinghai-Tibet Plateau, it is more vulnerable to degradation caused by permafrost melting. Future studies will likely continue to explore the carbon cycle at a larger scale, as well as the degradation process on the Qinghai-Tibet Plateau. The unique research direction on the Qinghai-Tibet Plateau should bring a different perspective to global permafrost vegetation research, with the region becoming one

收稿日期: 2022-06-11, 修回日期: 2022-07-28。

基金项目: 西藏大学高层次人才引进人才项目((2020)1号-20); 第二次青藏高原综合科学考察研究项目(2019QZKK0502)。

This work was supported by grants from the High-level Introduction of Talents Project of Tibet University ((2020)1-20) and Second Tibetan Plateau Scientific Expedition and Research (STEP) Program (2019QZKK0502)。

作者简介: 潘智鹏(1995-), 男, 硕士, 研究方向为青藏高原冻土植物生态学(E-mail: 601095152@qq.com)。

* 通讯作者(Author for correspondence. E-mail: fanliu@wbcas.com)。

of the most important study areas for permafrost vegetation.

Key words: Permafrost; Qinghai-Tibet Plateau; Vegetation; Climate change

永久冻土覆盖了北半球陆地面积的四分之一^[1, 2]。近 30 年来, 由于全球气候变暖的影响, 永久冻土层发生了大规模退化^[3]。世界第三极青藏高原大部分地区(约 $1.4 \times 10^6 \text{ km}^2$)被永久冻土覆盖^[4], 对气候变化高度敏感, 并且青藏高原冻土活动层的平均温度超过 2.0°C , 厚度不到 100 m ^[3]。从 1956 – 1983 年, 永久冻土活动层的厚度变化不大, 但从 1983 – 2005 年急剧上升(增加了 39 cm)^[5]。青藏高原是全球变暖的温度放大器, 气温在过去 50 年中每 10 年上升约 0.2°C , 约比全球变暖的速度快了两倍, 导致永久冻土的大量融化和冰川退缩速度增加^[6]。

永久冻土环境下高寒生态系统对气候变化相当敏感, 永久冻土的变化(活动层加深、热喀斯特过程等)会对高寒生态系统产生重大影响^[7, 8]。在环北极区, 永久冻土的生态系统退化是广泛而迅速的, 由于富含冰的冻土融化产生热喀斯特过程, 造成的永久冻土完全退化地区在 46 年内从 39% 增加到 46%^[9, 10]。在青藏高原地区, 随着活动层的加深, 高寒草甸植被覆盖和生物量显著减少, 高寒草甸生态系统土壤有机质含量呈指数级下降^[7]。冻土地区活动层加深和热喀斯特过程使得冻解的有机碳暴露, 大量有机碳被微生物利用, 以甲烷和二氧化碳的形式排放, 与全球气候变暖形成正反馈^[11], 而永久冻土碳损失的一个重要抵消是光合作用和植物生长从大气中吸收的碳增加。较高的温度可以直接刺激光合速率, 也可以延长生长季节^[12], 增加植物生物量和新土壤有机质中的碳储存。青藏高原低纬度高海拔的特点带来了与环北极带不同的环境特征, 拥有更多样的生态系统^[13], 活动层的迅速加深和热喀斯特过程的广泛分布也增加了碳排放, 加速了生态系统的退化。青藏高原冻土地区植被研究的重要性与日俱增, 分析冻土植被的研究主题和趋势将有助于确定青藏高原冻土植被的未来研究方向。

近年来, 在线数据库的快速发展使得人们越来越关注对涉及特定研究领域的文献的系统分析^[14]。一旦某研究领域达到一定的成熟度, 学者通常会将注意力集中在科学界产生的最新文献上。对该领域

积累的文献的研究可以揭示一个领域是否具有内向或外向的视角, 显示各思想流派及其之间的联系^[15, 16], 突出新思想和研究趋势。文献计量学有助于描绘特定研究或主题的趋势变化和最先进的领域^[17]。使用文献计量方法可以从统计学的角度进行更客观的分析^[18, 19], 对目标领域相关的文献进行大量基础(例如按年份划分的研究制表)和复杂(例如作者共同引用和共同作者身份)分析^[20]。文献计量研究旨在根据文献提取数据, 评估文献差异程度^[21, 22], 科学映射、试图突出结构和认知模式^[23, 24]。文献计量分析除了能够突出研究领域的不足以及可能的进展外, 还有助于阐明各主题的历史。譬如, Liu 等^[25]回顾了近 30 年来发表的 2836 篇关于淹没性大型植物的论文, 确定了特定物种的研究规范和宏观主题; Goh 等^[26]分析了 2000 – 2009 年的 142 篇文献, 阐述了水研究中政策与监管方面的问题。

本文利用文献计量学的方法收集了 1985 – 2021 年发表的 2867 篇全球永久冻土植被文献, 并针对青藏高原筛选出 157 篇, 分析比较了青藏高原永久冻土的植被研究现状和未来冻土地区植被多样性变化趋势, 以及全球冻土植被研究主题变化, 比较了全球和青藏高原研究的差异, 并预测了青藏高原冻土植被的研究趋势和发展方向。

1 研究方法

1.1 数据来源

本研究所用的数据来自 Web of Science 的 SCI 核心数据库。从 1990 年开始, 摘要被纳入 Web of Science 核心合集文档元数据^[27]。本文分析的文献出版于 1985 – 2021 年, 分为青藏高原永久冻土植被研究(157 篇)和全球冻土研究(2867 篇)。其中, 1985 年是全球首篇冻土植被文献发表的时间, 2021 年是最近年限, 2022 年发表的文章尚未记录完全, 因此不用于本研究。根据 Web of Science 的 SCI 扩展数据库布尔运算符: TS = 主题; AND = 并列关键词; OR = 关键词组连接; * = 模糊词语(可代替单复数后缀等), 采取以下代码用于青藏高原相关文章的检索: TS =

((permafrost AND Qinghai-Tibet Plateau AND plant *) OR (permafrost AND Qinghai-Tibet Plateau AND botan *) OR (permafrost AND Qinghai-Tibet Plateau AND vegetation *)))。对于全球冻土植被文献的计量学分析, 使用以下代码: TS = ((permafrost AND plant *) OR (permafrost AND botan *) OR (permafrost AND vegetation *)))。Web of Science 的 SCI 算法中包括基于文献信息自动提取关键词的 Keywords Plus^[25]。每个出版物的元数据包括: 作者、标题、来源(出版期刊)、国家/地区、关键字(包括加强关键字 Keywords Plus)、地址、主题类别和摘要。如果没有另行说明, 则所有下载的数据均为“. bib”文件, 使用 R studio 4.0.5 软件“bibliometrix”包中的“biblioshiny”函数和“biblioNetwork”函数进行分析^[14]。

1.2 分析方法

1.2.1 文献数量变化趋势

文献计量学可对各年份文献增长数量(增长率)、各国合作情况以及文献出处进行分析^[28]。本文将各年份文献数量汇总, 计算年度研究数量的增长率, 以文献数量变化反应研究热度, 并通过计算青藏高原冻土植被文献量占全球冻土植被文献量的比例, 分析青藏高原研究的受重视程度。分析各国文献合作情况可以了解当前研究最具影响力的国家和地区, 以及各国研究水平、研究策略和研究必要性。利用布拉德福定律(Bradford's laws)分析永久冻土植被研究领域文献的核心期刊来源, 通过对核心来源期刊影响因子等因素的考察, 理解该研究领域的重要性。本研究引入比率影响因子的概念:

$$\text{比率影响因子} = \frac{\text{核心期刊文献数量}}{\text{总文献数量}} \times \text{核心期刊影响因子} \quad (1)$$

该公式可以更好地表征全球和青藏高原冻土植被研究文献在核心期刊上的集中程度。

1.2.2 研究主题变化

本研究通过词云方式展示青藏高原和全球冻土植被研究的关键词, 采取 Keywords Plus 而不是作者给出的关键词, 因作者给出的关键词如“永久冻土”、“青藏高原”、“阿拉斯加”等非关键性背景词过多, 对研究主题分析没有帮助, 而

Keywords Plus 可自动识别、提取出现频率较高的词语, 从而减少背景词对主题的影响^[25]。同时, 将文献分为4个阶段, 分析了全球永久冻土的研究主题及其变化趋势。由于前期文献较少, 第一阶段为1985 – 2006年, 从2007年以后, 每5年为1个阶段(2007 – 2011、2012 – 2016、2017 – 2021)。不同研究阶段的主题用 Thematic Map 来显示, 加权后主要关键词出现在4个象限, 第1象限中的主题为热门主题, 其特点是高中心性和高密度, 意味着相关研究非常发达, 对研究领域很重要; 第4象限中的主题被称为基本和背景主题, 以高中心性和低密度为特征, 意味着这些主题对于一个领域非常重要, 是阶段性研究重点; 第3象限中的主题称为新兴或衰退主题, 具有低中心性和低密度, 意味着发展薄弱和边缘化或者是新兴主题; 第2象限中的主题被称为高发达和孤立的主题, 具有发达的内部连接(高密度)但不重要的外部连接(低中心性), 意味着它们对该领域的重要性有限但具有高专业性^[14]。

词云是对文献计量学研究的重要可视化结果, 本研究分别对全球和青藏高原文献出现频率前50位的关键词进行了可视化。

1.2.3 高被引文献和学术圈

本研究通过总结高被引文章的相互引用关系、学术圈分类, 分析了全球和青藏高原冻土植被研究的核心主题和各学术圈之间的关系。高被引文献之间的关系通过 NetworkTools 形式呈现, 将各文献引用关系高度可视化, 用于分析同一领域各学术圈的不同研究发展方向与合作^[28]。

2 结果与分析

2.1 文献数量变化

2.1.1 文献数量特征

文献计量学分析结果显示, 无论是全球还是青藏高原永久冻土植被研究都在逐年增加(图1), 表明冻土植被课题越来越受到关注。其中, 全球冻土植被研究出现时间更早(1985年), 文献年增长率为13.76%, 青藏高原冻土植被研究出现时间较晚(2002年), 但具有更高的文献年增长率(19.94%)(图1), 且二者增长率的差异与全球研究前期论文较少无关, 全球冻土植被研究从2002 – 2021年的年增长率仅为12.26%。

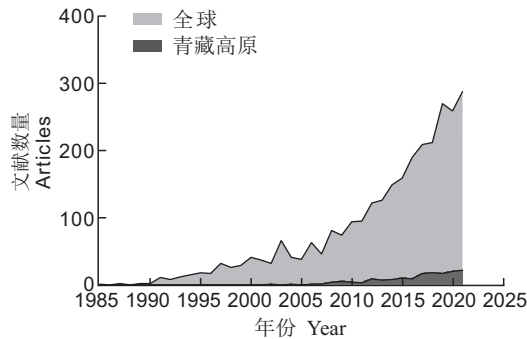


图 1 1985 – 2021 年全球和青藏高原冻土植被研究文献数量

Fig. 1 Number of published papers on permafrost vegetation research globally and from the Qinghai-Tibet Plateau during 1985 – 2021

2. 1. 2 布拉德福定律分析

本文通过布拉德福定律 (Bradford’s laws) 计算则统计了全球和青藏高原冻土植被研究的核心期刊来源，并计算了全球和青藏高原永久冻土植被研究的比率影响因子。对比全球(表 1)和青藏高原

(表 2)核心来源期刊影响因子可以发现，全球冻土研究核心来源期刊影响因子略高于青藏高原核心来源期刊。全球研究核心期刊类型较多，包括地学、遥感、生物、环境等多个领域，而青藏高原核心来源期刊类型较少，以地学和环境领域为主。虽然全球冻土研究核心来源影响因子略高于青藏高原，但青藏高原核心来源期刊具有更高的比率影响因子(表 2)，表明青藏高原研究更集中，平均文献质量更高。

2. 1. 3 文献合作分析

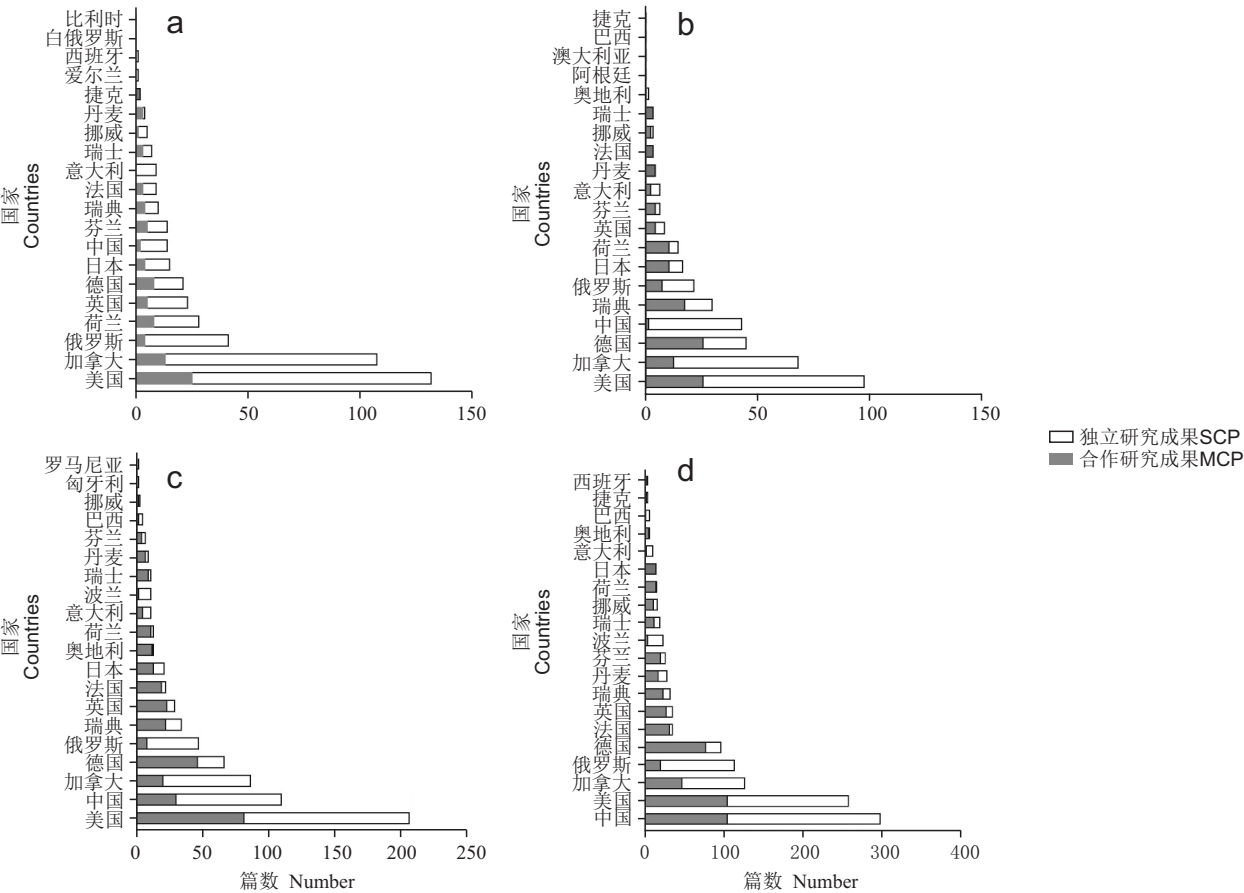
基于文献的研究合作可以更好地反映各国合作情况、研究领先国家、研究领先国家和地区的地理与科技优势等。本文根据 Thematic 分段，将文献合作情况分为 4 个阶段：1985 – 2006 年(图 2: a)，2007 – 2011 年(图 2: b)，2012 – 2016 年(图 2: c)，2017 – 2021 年(图 2: d)。2017 年之前，美国在文献数量上为全球冻土植被研究的引

表 1 全球冻土植被研究文献核心期刊来源、文献数量与核心期刊文献数量占比
Table 1 Sources of core journals, number of published papers, and proportion of core journals in global permafrost vegetation studies

核心期刊 Core journal	文献数量 Number	占比 / % Percentage	影响因子 Impact factor	比率影响因子 Ratio impact factor
Journal of Geophysical Research-Biogeosciences	115	4.0	3.82	0.15
Environmental Research Letters	110	3.8	4.37	0.17
Permafrost and Periglacial Processes	96	3.3	6.79	0.23
Global Change Biology	84	2.9	10.86	0.32
Biogeosciences	83	2.9	4.29	0.12
Quaternary Science Reviews	55	1.9	4.11	0.08
Remote Sensing	55	1.9	4.85	0.09
Science of the Total Environment	53	1.8	7.96	0.15
Catena	48	1.7	5.20	0.09
Arctic Antarctic and Alpine Research	44	1.5	2.50	0.04
Geophysical Research Letters	38	1.3	4.72	0.06
Geomorphology	34	1.2	2.13	0.03
Cryosphere	33	1.2	4.14	0.05
Geoderma	32	1.1	6.11	0.07

表 2 青藏高原冻土植被研究文献核心期刊来源、文献数量与核心期刊文献数量占比
Table 2 Sources of core journals, number of published papers, and proportion of core journals in Qinghai-Tibet Plateau permafrost vegetation studies

核心期刊 Core journal	文献数量 Number	占比 / % Percentage	影响因子 Impact factor	比率影响因子 Ratio impact factor
Journal of Mountain Science	13	8.3	2.071	0.17
Science of the Total Environment	10	6.4	7.963	0.51
Geoderma	9	5.7	6.114	0.35
Remote Sensing	9	5.7	4.848	0.28
Cold Regions Science and Technology	7	4.5	3.726	0.17
Permafrost and Periglacial Processes	7	4.5	4.368	0.19
Journal of Mountain Science	13	8.3	2.071	0.17



a: 1985 – 2006; b: 2007 – 2011; c: 2012 – 2016; d: 2017 – 2021。
灰色 (MCP) 为各个国家合作研究文献成果，白色 (SCP) 为各个国家独立研究文献成果。
Gray (MCP) represents collaborative research by various countries, white (SCP) represents independent research by each country.

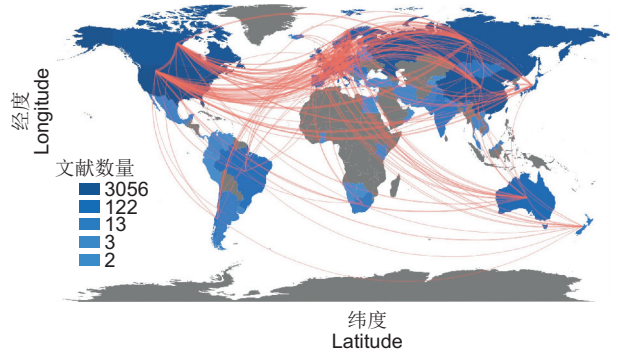
图 2 全球冻土植被不同阶段各个国家文献贡献量

Fig. 2 National literature contributions at different stages of global permafrost vegetation

领国家，2017 – 2021 年，中国从最初的第 8 位，超越美国，成为引领全球冻土植被研究的国家 (图 2: d)。

从 1985 年至今，研究早期，独立研究 (SCP) 贡献了 57.55% 的文献，同时各国合作研究 (MCP) 也在逐年增加，平均年增长率为 35.65%。排名前五的国家自主研究较多，排名靠后的国家自主研究较少，而以合作研究为主，从汇总的全球研究合作中也能得到类似结论 (图 3)。德国合作研究贡献最多，也是冻土植被研究文献贡献量排名前五的国家中唯一没有冻土的国家。此外，全球研究数量领先的国家中，拥有冻土的国家 (美国、中国、俄罗斯等) 独立研究成果较多。这可能有两个方面的原因，一是研究样地的便利性，如美国对阿拉斯加的研究，俄罗斯对西伯利亚的研究以及中国对青藏高原的研究，本

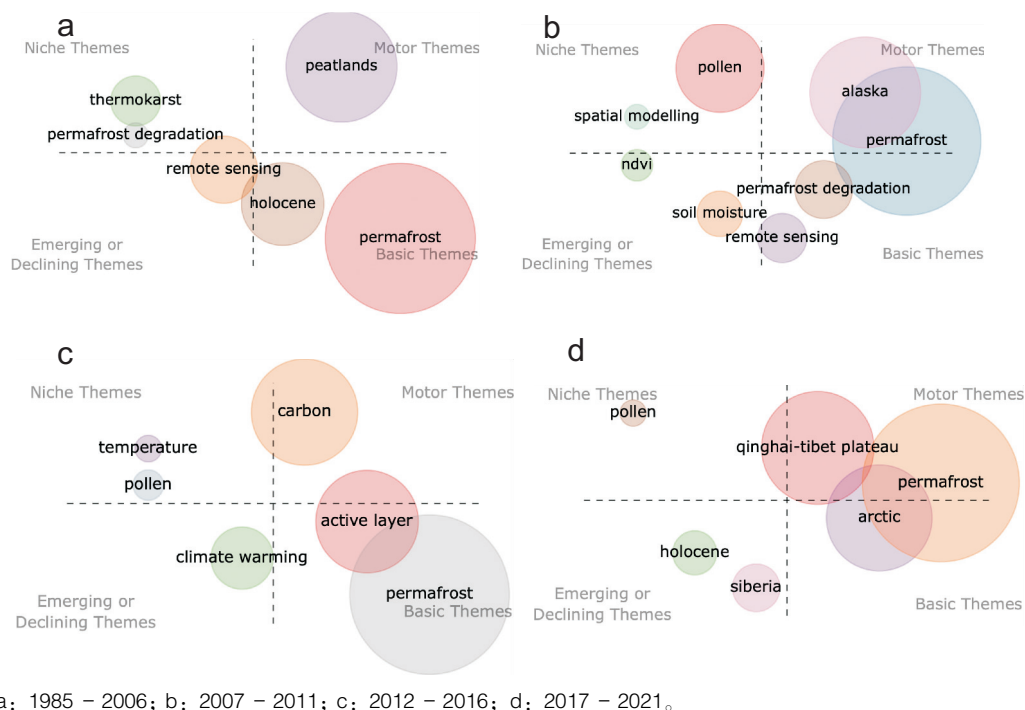
国研究区域的便利性会带来更多的研究成果；二是研究的必要性，永久冻土融化会直接影响冻土



两国间连线越粗则合作研究文献数量越多 (最小基数为 4 篇合作文献)；各个国家地图颜色越深代表发表文献数量越多。
Thicker connections between two countries indicate a greater number of cooperative research papers (minimum base is four cooperative papers); Darker colors on map of a country indicate greater number of published papers.

图 3 全球研究合作与文献贡献量

Fig. 3 Global research cooperation and literature contribution



a: 1985 - 2006; b: 2007 - 2011; c: 2012 - 2016; d: 2017 - 2021.

图 5 全球冻土植被研究主题演化图

Fig. 5 Thematic map of global permafrost vegetation research

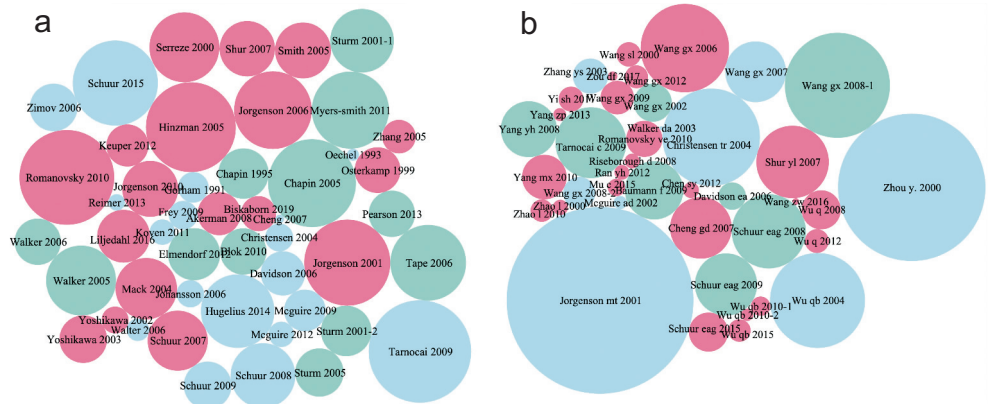
在第三阶段，2012 - 2016 年(图 5: c)，“冻土”仍然是基本主题，冻土的“活动层”作为背景主题出现并有向热门主题发展的趋势。“碳”成为该时期的热门研究主题。“气候变暖”作为新兴主题出现，同时也在向基本主题靠近，对气候变暖的研究逐渐增加。“花粉”的研究在第二阶段作为专业主题出现，在该阶段仍处于专业主题区域，同时关于“温度”的研究也在该区域。在这一时期，与碳排放相关的气候变化、冻土活动层等主题相继出现，全球气候变化引起的永久冻土活动层加深以及碳排放这一冻土地区最热门的研究主题逐渐确立。

在第四阶段，2017 - 2021 年(图 5: d)，“冻土”、“北极”和“青藏高原”为背景主题，说明北极和青藏高原为最新的全球冻土植被研究重点地区。“西伯利亚”开始出现在新兴研究区域，在最近的研究中西伯利亚也将成为重点研究区域。“全新世”这一主题被边缘化，关于全新世的地质研究可能已经非常完整，该主题研究的意义消失，即将退出。“花粉”这一研究主题从 2007 年出现至今一直处于专业研究区域，作为独立的研究小分支存在并将持续下去。

2.2.3 高被引文献与学术圈分析

本研究通过相互引用关系，将被引用率靠前的文献整合成网状结构(图 6)，其中相互引用频次较多的用同一颜色表示，而若干同色文献组成一个学术圈。全球(图 6: a)和青藏高原(图 6: b)冻土植被研究都分为了 3 个学术圈，下面就不同学术圈的主要研究内容进行概述，分析各学术圈的研究方向和趋势。

对于全球研究，蓝色圈作为最主流的研究领域，其研究方向是冻土有机碳(图 6: a)。该研究方向在不断改善模型和算法的基础上，结合实际调查，尽可能更准确地估算冻土地区的碳储量^[31-34]。永久冻土融化后，冻土中被封存的有机碳暴露在空气中，这些有机碳被微生物分解，产生温室气体，这个过程是气候变化中碳从陆地生态系统到大气的最重要的潜在反馈之一^[32]。由于冻土融化造成的大量有机碳以二氧化碳和甲烷等温室气体的形式进入大气，进而促进气候变暖^[35]，而植物通过光合作用从大气中吸收的碳在一定程度上可以抵消冻土融化带来的温室气体排放^[12]，冻土植被的研究价值也在于其对冻土碳排放具有吸收作用。目前对于冻土地区碳库估算的模型仍存在问题，植被的碳汇贡献、热喀斯特过程排放的温室气体以及永久冻土



a: 全球研究; b: 青藏高原研究。不同颜色代表不同的学术圈。a: 红色为模型和监测研究, 绿色为灌木、森林研究, 蓝色为冻土有机碳研究; b: 红色为植被的退化研究, 绿色为模型、遥感监测研究, 蓝色为植被退化率研究, 圆圆越大被引次数越多。
a: Global research; b: Qinghai-Tibet Plateau research. Different colors represent different academic circles. a: Red is model and monitoring research, green is shrub and forest research, blue is permafrost organic carbon study; b: Red is degradation of vegetation, green is model and remote sensing monitoring research, blue is vegetation degradation rate research. Larger circles indicate more citations.

图 6 全球和青藏高原高引用率文献关系图

Fig. 6 Relationship between high citation literatures globally and on the Qinghai-Tibet Plateau

快速融化(快速融化热融湖)时的极端量温室气体排放和气候模型都应考虑在内^[34, 36]。绿色圈是对以灌木、森林为主的冻土地区植被的研究^[37–39]。该研究领域常用的方法包括重复摄影、长期生态监测、遥感影像技术、NDVI 和树木年代学方法, 主要记录环北极地区、高纬度和高山苔原生态系统中以灌木为主的植被扩张^[39]。温度升高、积雪覆盖的变化、永久冻土融化引起的干扰状况改变、苔原火灾以及人为活动或食草强度的变化都有助于观察灌木丰度的变化。灌木覆盖的大规模增加将改变苔原生态系统的结构, 改变能量通量、区域气候、水、碳和养分的土壤–大气交换以及物种之间的生态相互作用^[38]。红色圈的研究方向是针对永久冻土地区的模型构建和监测^[7, 40, 41]。该研究方向加强了北半球极地地区的永久冻土监测网络, 并为几乎没有冻土信息数据的地区收集了永久冻土热状态的新信息。这种增强型监测网络非常重要, 可以据此来衡量未来的变化, 修正预测模型。

对于青藏高原研究(图 6: b), 红色圈作为主流研究领域, 主要研究方向是热喀斯特过程造成的永久冻土植被的退化^[3, 42, 43]。全球气候变化势必造成永久冻土退化^[43], 而热喀斯特过程则加剧了大气和地表之间的热交换。土壤中水分含量越大, 冻融循环对热交换的影响就越大。由于土壤冻结和

解冻, 大气和地表之间的水热交换对青藏高原的气候有重大影响, 这会导致湖水水位下降, 沼泽干燥, 草原萎缩。热融湖塘侧向热影响改变了其下部和周围区域土体的热状态, 使周围土体热状态处于动态平衡。利用 NDVI 在对青藏高原的研究中发现, 40 cm 深处土壤对温度变化非常敏感, 冻结和解冻过程在植物生长、土壤温度和水分含量中起着重要作用^[44]。青藏高原绿色圈的研究方向是利用模型、遥感技术来监测、估算永久冻土退化^[45–47]。永久冻土退化对地面和大气之间能量与水交换的影响需要大规模的密集监测网络、遥感调查和冻土模型, 以澄清气候变化、永久冻土退化及其环境影响的区域细节。青藏高原永久冻土的快速变暖和退化, 促使研究重点被放在利用 BIOME3 平衡陆地生物圈模型预测未来冻土条件的变化上^[46]。海拔模型(AM)^[47]、平均年地温度(MAGT)模型^[48]、表面霜冻数^[50]和永久冻土顶部温度(TTOP)模型都被用于评估青藏高原永久冻土退化的地理分布研究中。蓝色圈的主要研究方向是冻土地区植被退化率^[7, 50, 10]。青藏高原脆弱的低纬度永久冻土带高寒冷生态系统对自然和人为干扰的反应更为明显^[50, 51]。高寒草甸植被覆盖和生物量显著减少, 高寒草甸生态系统土壤有机质含量呈指数级下降, 表层土壤物质变粗质化。近 15 年来, 在永久冻土环境退化影响下, 高寒草甸分布面积减少了 7.98%, 高寒冷沼泽减少了 28.11%, 青海冻土地

区的高寒冷草甸可能会严重退化，当地植被覆盖率可能会降低到70%或更低^[10]。永久冻土完全退化（塌陷疤痕和沼泽）的地区在过去46年内已从39%增加到46%^[10]。

3 讨论

从1985年开始，全球和青藏高原的永久冻土植被研究都在逐渐增多，除了冻土研究的持续增加外，与科技发展（遥感卫星技术等）、新兴技术的加入以及以大数据分析为主的交叉学科的介入也密不可分。青藏高原研究起步较晚，但增长率高，并在2017–2021年间引领世界冻土植被的研究，这与更多的合作者参与、国家政策的大力支持（以第二次青藏高原科考为主）也有着紧密联系。比率影响因子高于全球研究，可能是因为全球研究的方向更广泛，而青藏高原的研究重心更为集中，均围绕植被退化展开，研究内容相对集中，多数文献发表在核心期刊上，产生了高比率影响因子。

从Thematic趋势图可以发现，青藏高原作为热点地区在2012–2016年出现，但在2017年至今又退出了热点研究地区，可能原因如下：首先是研究地域的大小，环北极地区面积广大，而青藏高原面积较小，相对于环北极地区可研究区域也少一些；其次是研究主题的区别，全球永久冻土植被主要研究主题是在全球变化响应下的冻土碳排放，植被研究方向主要是其参与冻土碳循环的情况，而青藏高原的主要研究主题是植被的退化，该研究主题在全球层面上并不是主流，从而导致青藏高原的文献数量没有环北极地区多。虽然青藏高原退出全球热点研究地区，但从其冻土植被研究文献增长率（19.94%）可以看出，青藏高原的研究热度并非降低，而是正在快速增加，形成了独立的研究方向，未来必将会成为世界最重要的冻土植被研究地区。

从高被引文献分析和主题趋势变化可以发现，对于永久冻土地区植被研究而言，全球主流研究方向和青藏高原研究方向不一致，全球研究热点在冻土融化上，该过程会暴露大量有机碳，这些碳会被利用，形成以甲烷和二氧化碳为主的温室气体并排放到大气中，进而促进气候变暖。围绕这个研究主题方向，研究者不断优化模型估算碳储量，并对环北极地区进行长期的监测工作。而冻土地区植被的作用是参与冻土碳循环，通过光合作用减少冻土地

区碳排放。青藏高原地区的研究则主要集中在冻土地区植被退化，以及热喀斯特过程造成的植被退化，通过模型、遥感等技术对植被退化的情况进行估算。全球冻土植被研究以冻土碳循环为研究重点，植物为辅；而青藏高原以植被退化为最主要的研究主题，这就导致了青藏高原研究方向偏离全球热点研究，造成了在研究主题变化中青藏高原冻土植被减弱的现象。

我们推测，青藏高原冻土植被研究的侧重点为植被退化的原因可能在于其特有的高生态系统多样性和植被物种多样性。青藏高原作为世界第三极，拥有完整且多样的生态系统^[10]，这些生态系统较原始，人为扰动极小，具有非常高的研究价值。而全球变暖带来的冻土融化使得生态系统退化，相比于环北极地区，生态系统的退化对青藏高原植被带来的破坏巨大，因此青藏高原的研究重点主要集中在植被上。

4 结论

本文通过文献计量学方法统计了全球冻土植被文献，发现在全球气候变暖的背景下，冻土地区植被研究越来越受到重视，研究数量逐年增加，遥感技术、各种数学模型等新方法的加入也推动了研究发展。青藏高原研究虽然起步较晚，但其文献增长率和比率影响因子均高于全球冻土植被研究，青藏高原将成为全球最重要的冻土植被研究地区之一。在研究主题方面，全球研究重点在冻土融化产生的碳排放估算以及冻土地区植物在固碳中的作用；而青藏高原的研究重点则是冻土地区植被的退化。青藏高原的冻土植被研究独立于全球研究热点，为全球研究提供了新的思路和角度。

参考文献：

- [1] Gruber S. Derivation and analysis of a high-resolution estimate of global permafrost zonation [J]. *Cryosphere*, 2012, 6(1): 221–233.
- [2] Camill P. Permafrost thaw accelerates in boreal peatlands during late-20th century climate warming [J]. *Clim Change*, 2005, 68(1–2): 135–152.
- [3] Cheng GD, Wu TH. Responses of permafrost to climate change and their environmental significance, Qinghai-Tibet Plateau [J]. *J Geophys Res Earth Surf*, 2007, 112(F2): F02S03.
- [4] Zhao L, Ping CL, Yang DQ, Cheng GD, Ding YJ, Liu SY.

- Changes of climate and seasonally frozen ground over the past 30 years in Qinghai-Xizang (Tibetan) Plateau, China [J]. *Glob Planet Change*, 2004, 43(1-2): 19-31.
- [5] Niu FJ, Lin ZJ, Liu H, Lu JH. Characteristics of thermokarst lakes and their influence on permafrost in Qinghai-Tibet Plateau [J]. *Geomorphology*, 2011, 132(3-4): 222-233.
- [6] Chen H, Zhu QA, Peng CH, Wu N, Wang Y, *et al.* The impacts of climate change and human activities on biogeochemical cycles on the Qinghai-Tibetan Plateau [J]. *Glob Chang Biol*, 2013, 19(10): 2940-2955.
- [7] Wang GX, Li YS, Wu QB, Wang YB. Impacts of permafrost changes on alpine ecosystem in Qinghai-Tibet Plateau [J]. *Sci China Ser D Earth Sci*, 2006, 49(11): 1156-1169.
- [8] Jones BM, Grosse G, Arp CD, Jones MC, Anthony KMW, Romanovsky VE. Modern thermokarst lake dynamics in the continuous permafrost zone, northern Seward Peninsula, Alaska [J]. *J Geophys Res Biogeosci*, 2011, 116(G2): G00M03.
- [9] Kanevskiy M, Shur Y, Fortier D, Jorgenson MT, Stephani E. Cryostratigraphy of late Pleistocene syngenetic permafrost (yedoma) in northern Alaska, Itkillik River exposure [J]. *Quat Res*, 2011, 75(3): 584-596.
- [10] Jorgenson MT, Racine CH, Walters JC, Osterkamp TE. Permafrost degradation and ecological changes associated with a warming climate in central Alaska [J]. *Clim Change*, 2001, 48(4): 551-579.
- [11] Lin ZJ, Niu FJ, Xu ZY, Xu J, Wang P. Thermal regime of a thermokarst lake and its influence on permafrost, Beiluhe Basin, Qinghai-Tibet Plateau [J]. *Permafr Periglac Process*, 2010, 21(4): 315-324.
- [12] Myneni RB, Keeling CD, Tucker CJ, Asrar G, Nemani RR. Increased plant growth in the northern high latitudes from 1981 to 1991 [J]. *Nature*, 1997, 386(6626): 698-702.
- [13] Nan ZT, Li SX, Cheng GD. Prediction of permafrost distribution on the Qinghai-Tibet Plateau in the next 50 and 100 years [J]. *Sci China Ser D Earth Sci*, 2005, 48(6): 797-804.
- [14] Aria M, Misuraca M, Spano M. Mapping the evolution of social research and data science on 30 years of *Social Indicators Research* [J]. *Soc Indic Res*, 2020, 149(3): 803-831.
- [15] Hubert LJ, Levin JR. Inference models for categorical clustering [J]. *Psychol Bull*, 1977, 84(5): 878-887.
- [16] Van Leeuwen T. The application of bibliometric analyses in the evaluation of social science research. Who benefits from it, and why it is still feasible [J]. *Scientometrics*, 2006, 66(1): 133-154.
- [17] Bellardo T. An investigation of online searcher traits and their relationship to search outcome [J]. *J Am Soc Inf Sci*, 1985, 36(4): 241-250.
- [18] Pritchard A. Statistical bibliography or bibliometrics? [J]. *J Doc*, 1969, 25(4): 348-349.
- [19] Diodato VP, Gellatly P. Dictionary of Bibliometrics [M]. London: Routledge, 2013: 10-25.
- [20] McBurney MK, Novak PL. What is bibliometrics and why should you care? [C]//Proceedings IEEE International Professional Communication Conference. Portland: IEEE, 2002: 108-114.
- [21] Curl EA, Lartey R, Peterson CM. Interactions between root pathogens and soil microarthropods [J]. *Agric Ecosyst Environ*, 1988, 24(1-3): 249-261.
- [22] White HD, McCain KW. Visualizing a discipline: an author co-citation analysis of information science, 1972 - 1995 [J]. *J Am Soc Inf Sci*, 1998, 49(4): 327-355.
- [23] Noyons ECM, Moed HF, van Raan AFJ. Integrating research performance analysis and science mapping [J]. *Scientometrics*, 1999, 46(3): 591-604.
- [24] Börner K, Chen CM, Boyack KW. Visualizing knowledge domains [J]. *Annu Rev Inf Sci Technol*, 2003, 37(1): 179-255.
- [25] Liu H, Peng K, Li W, Cao Y. Investigation on the trends and characteristics of articles on submerged macrophytes: perception from bibliometrics between 1991 and 2018 [J]. *J Freshwater Eco*, 2019, 34(1): 703-713.
- [26] Goh KH, See KF. Twenty years of water utility benchmarking: a bibliometric analysis of emerging interest in water research and collaboration [J]. *J Clean Prod*, 2021, 284: 124611.
- [27] Zhang YL, Yao XL, Qin BQ. A critical review of the development, current hotspots, and future directions of Lake Taihu research from the bibliometrics perspective [J]. *Environ Sci Pollut Res*, 2016, 23(13): 12811-12821.
- [28] Aria M, Cuccurullo C. *Bibliometrix*: an R-tool for comprehensive science mapping analysis [J]. *J Informetr*, 2017, 11(4): 959-975.
- [29] 王绍令, 米海珍. 青藏公路铺筑沥青路面后路基下多年冻土的变化 [J]. 冰川冻土, 1993, 15(4): 566-573.
- Wang SL, Mi HZ. The change of permafrost under roadbed with asphalt pavement along the Qinghai-Tibet highway [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 1993, 15(4): 566-573.
- [30] Vonk JE, Tank SE, Bowden WB, Laurion I, Vincent WF, *et al.* Reviews and syntheses: effects of permafrost thaw on Arctic aquatic ecosystems [J]. *Biogeosciences*, 2015, 12(23): 7129-7167.

- [31] Hugelius G, Strauss J, Zubrzycki S, Harden JW, Schuur EAG, *et al.* Estimated stocks of circumpolar permafrost carbon with quantified uncertainty ranges and identified data gaps[J]. *Biogeosciences*, 2014, 11(23): 6573–6593.
- [32] Schuur EAG, Bockheim J, Canadell JG, Euskirchen E, Field CB, *et al.* Vulnerability of permafrost carbon to climate change; implications for the global carbon cycle[J]. *Bioscience*, 2008, 58(8): 701–714.
- [33] Tarnocai C, Canadell JG, Schuur EAG, Kuhry P, Mazhitova G, Zimov S. Soil organic carbon pools in the northern circumpolar permafrost region[J]. *Global Biogeochem Cycles*, 2009, 23(2): GB2023.
- [34] Canadell JG, Pataki DE, Gifford R, Houghton RA, Luo YQ, *et al.* Saturation of the terrestrial carbon sink[M]// Canadell JG, Pataki DE, Pitelka LF, eds. *Terrestrial Ecosystems in A Changing World*. Berlin: Springer, 2007: 59–78.
- [35] Abbott BW, Jones JB. Permafrost collapse alters soil carbon stocks, respiration, CH₄, and N₂O in upland tundra[J]. *Glob Chang Biol*, 2015, 21(12): 4570–4587.
- [36] Anthony KW, von Deimling TS, Nitze I, Frohling S, Emond A, *et al.* 21st-century modeled permafrost carbon emissions accelerated by abrupt thaw beneath lakes[J]. *Nat Commun*, 2018, 9(1): 3262.
- [37] Foley JA, DeFries R, Asner GP, Barford C, Bonan G, *et al.* Global consequences of land use[J]. *Science*, 2005, 309(5734): 570–574.
- [38] Tape K, Sturm M, Racine C. The evidence for shrub expansion in northern Alaska and the Pan-Arctic[J]. *Glob Chang Biol*, 2006, 12(4): 686–702.
- [39] Myers-Smith IH, Forbes BC, Wilkening M, Hallinger M, Lantz T, *et al.* Shrub expansion in tundra ecosystems: dynamics, impacts and research priorities[J]. *Environ Res Lett*, 2011, 6(4): 45509.
- [40] Romanovsky VE, Smith SL, Christiansen HH. Permafrost thermal state in the polar northern hemisphere during the international polar year 2007–2009: a synthesis[J]. *Permafrost Periglacial Process*, 2010, 21(2): 106–116.
- [41] Hinzman LD, Bettez ND, Bolton WR, Chapin FS, Dyurgerov MB, *et al.* Evidence and implications of recent climate change in northern Alaska and other arctic regions[J]. *Clim Change*, 2005, 72(3): 251–298.
- [42] 崔巍, 吴青柏, 刘永智. 热融湖塘对多年冻土的热影响[J]. 冰川冻土, 2010, 32(4): 755–760.
- Cui W, Wu QB, Liu YZ. The thermal effect of a thermokarst lake on permafrost[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2010, 32(4): 755–760.
- [43] 吴吉春, 盛煜, 吴青柏, 温智. 青藏高原多年冻土退化过程及方式[J]. 中国科学: 地球科学, 2009, 39(11): 1570–1578.
- Wu JC, Sheng Y, Wu QB, Wen Z. Processes, and modes of permafrost degradation on the Qinghai-Tibet Plateau[J]. *Sci China Ser D: Earth Sciences*, 2009, 39(11): 1570–1578.
- [44] Wu QB, Shi B, Liu YZ. Interaction study of permafrost and highway along Qinghai-Xizang highway[J]. *Sci China Ser D: Earth Sci*, 2003, 46(2): 97–105.
- [45] Yang MX, Nelson FE, Shiklomanov NI, Guo DL, Wan GN. Permafrost degradation and its environmental effects on the Tibetan Plateau: a review of recent research[J]. *Earth-Sci Rev*, 2010, 103(1–2): 31–44.
- [46] 郑度, 林振耀, 张雪芹. 青藏高原与全球环境变化研究进展[J]. 地学前缘, 2002, 9(1): 95–102.
- Zheng D, Lin ZY, Zhang XQ. Progress in studies of Tibetan Plateau and global environmental change[J]. *Earth Science Frontiers*, 2002, 9(1): 95–102.
- [47] Haxeltine A, Prentice IC. BIOME3: an equilibrium terrestrial biosphere model based on ecophysiological constraints, resource availability, and competition among plant functional types[J]. *Global Biogeochem Cycles*, 1996, 10(4): 693–709.
- [48] 程国栋, 王绍令. 试论中国高海拔多年冻土带的划分[J]. 冰川冻土, 1982(2): 4–20.
- Cheng GD, Wang SL. On the zonation of high-altitude permafrost in China[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 1982(2): 4–20.
- [49] Li SX, Nan ZT, Zhao L. Impact of soil freezing and thawing process on thermal exchange between atmosphere and ground surface[J]. *J Glaciol Geocryol*, 2002, 24(5): 506–511.
- [50] Nelson FE, Outcalt SI. A computational method for prediction and regionalization of permafrost[J]. *Arct Alp Res*, 1987, 19(3): 279–288.
- [51] 吴青柏, 沈永平, 施斌. 青藏高原冻土及水热过程与寒区生态环境的关系[J]. 冰川冻土, 2003, 25(3): 250–255.
- Wu QB, Shen YP, Shi B. Relationship between frozen soil together with its water-heat process and ecological environment in the Tibetan Plateau[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2003, 25(3): 250–255.

(责任编辑: 李惠英)