

基于CiteSpace的冻土区土壤有机碳研究进展

冯钰时

哈尔滨师范大学地理科学学院，黑龙江 哈尔滨

收稿日期：2024年5月28日；录用日期：2024年7月25日；发布日期：2024年8月1日

摘要

基于Web of Science核心数据库，通过文献计量可视化应用软件CiteSpace，对冻土区土壤有机碳的研究文献从发展路径、主题演变以及研究热点等方面进行剖析，以此探讨该领域的研究现状、热点和发展态势。结果表明，冻土区土壤有机碳领域的论文发表数量呈增长趋势，发文总量最多的国家是美国和中国，中国科学院是发文量最高的机构，但论文整体质量有待继续提高。被引频次和共被引次数最多的均是来自美国北亚利桑那大学的学者Schuur教授，从高频关键词和共现网络视图上看，1990~2022年冻土区土壤有机碳研究内容主要涉及“soil respiration (土壤呼吸)”、“dynamics (动力学)”、“soil organic carbon (土壤有机碳)”、“rock glacier (冰石流)”、“climate change (气候变化)”。关键词聚类分析表明，近几年来，该领域逐渐关注“dynamics (动力学)”“rock glacier (冰石流)”“climate change (气候变化)”及“active layer (活动层)”对冻土区土壤有机碳的影响。从突现词分析可知，青藏高原冻土区土壤有机碳、特定景观或地形下的冻土区土壤有机碳以及降水量对冻土区土壤有机碳的影响是未来该研究领域的重要方向和热点内容。

关键词

冻土区，CiteSpace，研究热点，土壤有机碳

Research Progress on Soil Organic Carbon in Permafrost Regions Based on CiteSpace

Yushi Feng

School of Geographical Science, Harbin Normal University, Harbin Heilongjiang

Received: May 28th, 2024; accepted: Jul. 25th, 2024; published: Aug. 1st, 2024

Abstract

Based on the Web of Science core database, using the bibliometric visualization application soft-

ware CiteSpace, this paper analyzes the research literature on soil organic carbon in permafrost areas from the aspects of development path, thematic evolution, and research hotspots, in order to explore the research status, hotspots, and development trends in this field. The results show that the number of papers published in the field of soil organic carbon in permafrost regions is increasing. The countries with the largest number of papers are the United States and China, and the Chinese Academy of Sciences is the institution with the highest number of papers, but the overall quality of papers needs to be further improved. Professor Schuur, a scholar from the University of North Arizona in the United States, has the highest frequency of citations and co citations. From high-frequency keywords and co-occurrence network views, the research on soil organic carbon in permafrost regions from 1990 to 2022 mainly involves "soil respiration", "dynamics", "soil organic carbon", "rock glacier", and "climate change". Keyword clustering analysis shows that in recent years, the field has gradually focused on the impact of "dynamics", "rock glacier", "climate change", and "active layer" on soil organic carbon in permafrost regions. From the analysis of emergent words, it can be seen that the soil organic carbon in permafrost areas of the Qinghai Tibet Plateau, the soil organic carbon in permafrost areas under specific landscapes or terrains, and the impact of precipitation on soil organic carbon in permafrost areas are important directions and hot topics in this research field in the future.

Keywords

Permafrost Region, CiteSpace, Research Hotspots, Soil Organic Carbon

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

土壤有机碳含量(SOC)是衡量土壤肥力的一个重要指标,对保持土壤营养元素的含量与有效性,促进土壤结构与土壤孔隙结构的形成与稳定性起着十分关键的作用[1]。土壤是地球最大的有机碳库,土壤有机碳库的微小变化能导致大气二氧化碳浓度的显著改变[2]。据统计,永久冻土覆盖了北半球 1/4 左右的陆地面积,存储了约 1100~1500 pg 的有机碳,约占全球碳库的一半[3],而土壤冻结状态和低温限制了微生物的活性,有效减少了对有机碳的降解[4]。

世界气候变迁对未来自然环境的影响一直是国内外学者共同关注的焦点,而土壤有机碳库作为陆地生态系统碳库的重要组成部分,在碳循环过程中扮演着重要角色[5]。多年冻土退化所释放的温室气体将加速气候变暖[6],导致增强的温室效应,改变原来的碳收支平衡,逐渐由大气向多年冻土区的土壤积累碳转为由土壤向大气排放碳[7],另一方面也会促进区域内植物生长和净初级生产力的增加,从而抵消一部分碳释放[8],复杂的碳循环过程和反馈机制使得人们对未来碳循环和气候变化的评估存在较大的不确定性[9]。土壤有机碳分布特征及其影响因素的研究是认识有机碳在水土气生之间迁移变化的先决条件,有助于探讨减少土壤有机碳的矿化分解,延长土壤碳驻留时间等问题。因此,很多学者研究了土壤有机碳分布特征及其影响因素。他们发现在海拔和纬度分布上,研究区土壤有机碳含量随海拔的升高而增加,随纬度的增加而降低,气候因子是影响研究区土壤有机碳含量分布的主要因素[10]-[12]。冻土区土壤有机碳研究已取得一定成果,但缺乏从科研机构、研究内容和研究热点等角度对冻土区土壤有机碳的定量研究,并且缺乏对其研究成果和发展趋势的研究。文献计量是基于数学和统计学方法对某研究领域进行定量分析的一种手段,采用计量学指标可进行研究现状和研究热点的剖析以及科研创新性的客观评价,目

前也成为了国际主流的科研评价方法[13]，广泛应用于各学科领域[14]-[17]。为此，本项目拟对冻土区土壤有机碳研究的阶段性结果进行归纳、梳理，并对其研究热点和演变趋势进行分析，这对于深入认识和推动冻土区土壤有机碳研究具有十分重要的理论和现实意义。

本文基于 Web of Science 核心合集论文数据库，借助于文献可视化分析软件 CiteSpace 进行信息挖掘。对冻土区土壤有机碳的相关文献进行可视化知识图谱分析，梳理冻土区土壤有机碳的研究状况和发展过程，总结出该领域的研究重点和热点，以期对冻土区土壤有机碳的研究做出较为全面的认识，并为冻土区土壤有机碳的研究提供一定的借鉴。

2. 研究数据来源与分析方法

2.1. 文献来源和数据处理

Web of Science 数据库是国际公认权威的综合性学术信息资源数据库[18]，被认为是大多数科研领域中最重要且使用频率最高的数据库[19]。本研究主要针对冻土区土壤有机碳相关研究进行文献计量分析，选自 Web of Science (WoS)核心合集(包括 SCI-E 科学引文索引、SSCI 社会科学引文索引)、检索时段范围为 1990-01-01~2022-12-31。高级检索式为“TS=[(“permafrost*” OR “frozen soil*” OR “frozen ground*” OR “freezing soil*” OR “frost soil*”) AND (“Soil organic carbon” OR “SOC*” OR “SOM*”)]”，鉴于土壤 SOC 在很多课题研究中有所涉及，但并不代表这些文献是专门研究土壤 SOC 的，故手动验证筛选剔除非该研究领域的文献后，共得到 2600 篇 WoS 来源的文献样本，检索结果以全记录与引用的纯文本格式将数据导出，以“download_1-514.txt”格式命名保存。文献样本数据再通过 CiteSpace 软件内置(Data/Import & Export)完成 WoS 数据格式转化；同时，在文件夹 project 创建 txt 文件(命名 citespace.alias)进行相似关键词合并，得到研究所需的基础数据。

2.2. 研究方法

Cite Space 是 2004 年美国 Drexel University 陈超美博士基于 Java 语言开发的一款应用于科学领域的发展进行交互式和探索性分析的软件[20]，对科学领域文献进行计量、识别并分析，通过数据可视化可以探究研究热点、前沿及演变趋势[21]。本文中使用 Citespace5.7R2 软件对文献数据进行可视化分析[22]。在使用软件分析前，先进行参数设定：时区分割为 1990-01~2022-12，时间切片设置为 5 年；节点类型：keyword 或 country；节点阈值：Top30 (关键词共现分析)、Top50 (国家/地区和机构合作分析)；网络裁剪方式选择 pathfinder、pruning the merged network 和 pruning sliced networks，其他默认选项，以“country”为节点进行合作网络分析，以“keyword”为节点进行共现分析以及聚类分析和突显词(burst)分析，并绘制相关图表，进而探究冻土区 SOC 研究热点。通过对 1990~2022 年在冻土区土壤有机碳领域相关文献的发表国家、发表机构、被引频次、关键词等信息进行分析，得到了当前冻土区土壤有机碳领域的研究热点与发展趋势。

3. 结果与讨论

3.1. 冻土区土壤有机碳研究的发展路径

发文数量的时间分布可以反应该领域的发展趋势。1990 年至 2022 年间该主题的发文数量大致经历了 3 个不同的增长阶段，整体呈现显著增加的趋势(图 1)。本领域的研究从 1990 年起步(4 篇)直至 2002 年间，呈现出发文数量较少，年增长趋势不明显的特点，属于概念形成与奠基阶段。2003 年至 2012 年间，研究文献数量开始稳步增加，进入平稳增长期。在 2012 年以后，发文数量迅速增加，年发文量的增速也显著加快，2022 年达到了近年来的最高点(274 篇)，研究进入快速增长阶段。这表明冻土区土壤有机碳越发引起国内外研究工作者的广泛关注，该研究领域逐渐向成熟化发展。

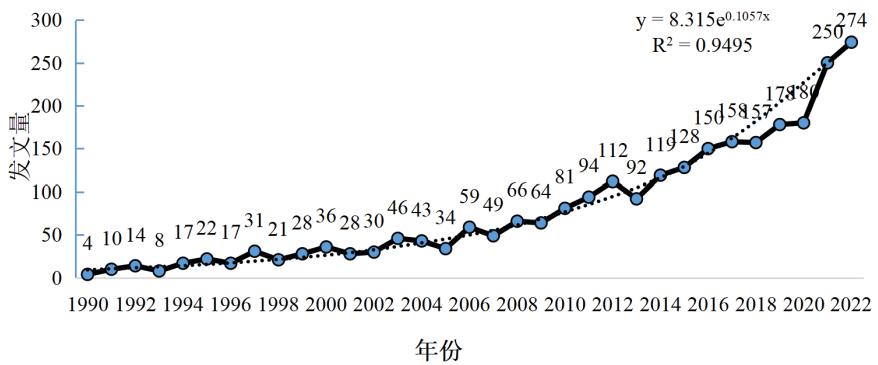


Figure 1. Trends in the number of publications on soil organic carbon in permafrost regions (1990~2022)

图 1. 冻土区土壤有机碳研究的发文数量变化趋势(1990 年~2022 年)

Table 1. Top 15 countries and institution of published papers
表 1. 发文量前 15 的国家与机构

排名 Rank	国家 Country	频数 Count	中心性 Centrality	机构 Institution	频数 Count	中心性 Centrality
1	USA (美国)	827	0.18	Chinese Academy of Sciences (中国科学院)	400	0.18
2	China (中国)	638	0.05	Russian Academy of Sciences (俄罗斯科学院)	226	0
3	Canada (加拿大)	464	0.35	University of Alaska Fairbanks (阿拉斯加费尔班克斯大学)	159	0
4	Russia (俄罗斯)	371	0.13	University of Chinese Academy of Sciences (中国科学院大学)	125	0
5	Germany (德国)	290	0.39	Stockholm University (斯德哥尔摩大学)	111	0
6	Sweden (瑞典)	205	0.08	The United States Geological Survey (美国地质调查局)	89	0.03
7	England (英国)	204	0.56	University of Colorado (科罗拉多大学)	64	0.32
8	France (法国)	169	0.32	Lanzhou University (兰州大学)	62	0.2
9	Norway (挪威)	133	0.71	University of Alberta (阿尔伯塔大学)	61	0.68
10	Switzerland (瑞士)	112	0.05	University of Copenhagen (哥本哈根大学)	58	0.14
11	Japan (日本)	98	0	University of Oslo (奥斯陆大学)	49	0.52
12	Denmark (丹麦)	89	0.07	University of Laval (拉瓦尔大学)	46	0.03
13	Finland (芬兰)	80	0.21	University of Alaska (阿拉斯加大学)	43	0.1
14	Italy (意大利)	75	0	University of Potsdam (波茨坦大学)	41	0.03
15	Austria (奥地利)	74	0.03	Lund University (隆德大学)	40	0.23

运用 CiteSpace 的国家合作网络分析功能对 1636 篇文献的发文国家(地区)和机构进行分析, 得到主要发文国家和机构排名(表 1)和国家和机构知识图谱(图 2)。冻土区土壤有机碳研究发文量较大的前 15 个国家(地区)和机构如表 1 所示, 国家(地区)和机构分布知识图谱如图 2 所示。从表 1 可知: 冻土区土壤有机碳方面研究发文量最大的国家为美国(USA) (827), 其次为中国(China) (638)、Canada (加拿大) (464)、Russia (俄罗斯) (371) 和 Germany (德国) (290)。而中心性最高的国家为挪威(0.71), 其次为英国(0.56)、德国(0.39)、加拿大(0.35)和法国(0.32)。本文结果表明具有高发文量的国家其在知识图谱中不一定具有较高的中心值(图 2), 如美国(0.18)这一节点的中心值低于加拿大(0.35)。此外, 中国、瑞士、奥地利、日本和意大利等国在知识图谱中的中心值也较低, 表明这些国家的研究者与其他国家合作较少[22]-[24]。

对主要的发文机构进行分析, 能够更好地了解当前冻土区土壤有机碳领域研究最多、最具权威的机构(表 1)。有来自全世界 2359 家机构参与了该领域的研究, 其中发文量排名前 15 位的机构发文量共 2398 篇, 占总发文量的 91.8%, 包括 4 家美国机构、3 家中国机构、瑞典和加拿大各有 2 家机构, 俄罗斯、丹麦、挪威和德国各有 1 家。这些机构基本都来自发达国家, 只有中国是发展中国家。中国科学院是发文量最高的机构, 其发文量约为排名第二的俄罗斯科学院的 2 倍, 但是在中心性方面, 阿尔伯塔大学拥有最高的中心性, 其次为奥斯陆大学和科罗拉多大学。来自美国的 3 家机构其中心性都较高, 说明美国在冻土区土壤有机碳具有一定的权威性。

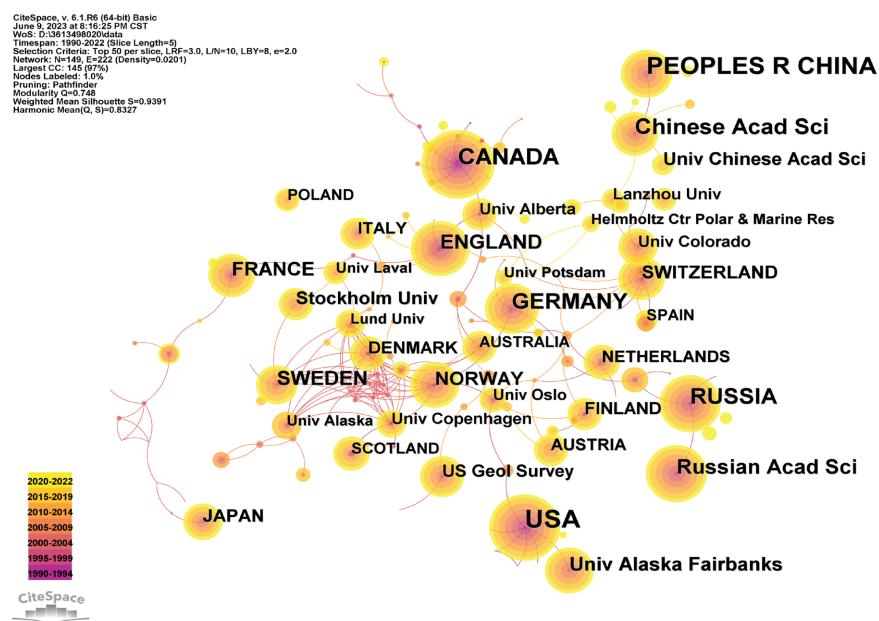


Figure 2. The co-occurrence map of cooperation between countries (regions) and institutions
图 2. 国家(地区)与机构合作共现图谱

利用 CiteSpace 软件对发文前 50 的国家(地区)与机构合作关系进行可视化分析, 得到如图 2 所示的国家(地区)和机构合作关系网络图, 黑色标签代表国家(地区)和机构名称, 节点大小代表了发文量的多少; 节点年轮颜色代表发文时间的远近, 年轮宽度代表该年的累计发文量; 节点间连线长度代表合作关系的紧密程度(长度越长, 合作关系越弱)。在冻土区土壤有机碳方面, 该网络中有 149 个节点和 222 条连线, 这表明各个国家(地区)与机构之间的合作关系错综复杂。相较于其他国家(地区), 中国的机构在冻土区土壤有机碳研究领域上合作方面比较单一。欧盟国家和机构间的合作次数较多, 尤其是丹麦、挪威和瑞典及其机构之间的合作非常紧密。

通过 Web of Science 数据库统计分析发现，文献被引期刊出现频次 700 以上的分别为 Nature (1294)、Permafrost Periglac (1176)、Science (1100)、Geophys Res Lett (1073)、Global Change Biol (854)、P Natl Acad SCL USA (747)、J Geophys Res-Atmos (745)、J Geophys Res-Bioge (715) (图 3)。而中心性较高的被引期刊分别为 Nature (0.51)、Biogeosciences (0.48)、3rd P Int Offsh Mech (0.42)、Geophys Res Lett (0.37)、Quaternary Res (0.36)、Geology (0.32)、Soil Biol Biochem (0.31)、Global Change Biol (0.28)、Z Geomorphol (0.24)、Geogr Ann A (0.23)。这表明 Nature、Biogeosciences、3rd P Int Offsh Mech、ISEM Journal 等期刊冻土区土壤有机碳的研究领域具有重要贡献。

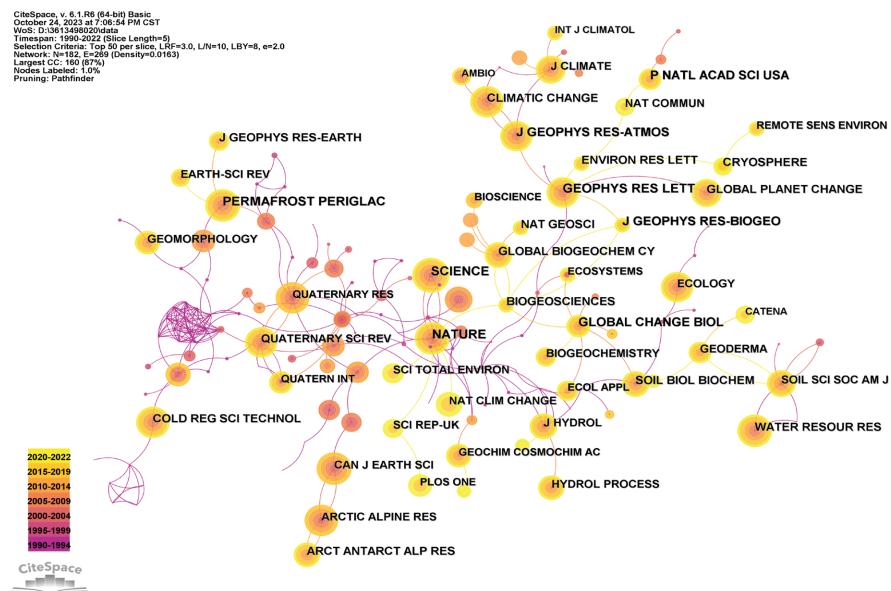


Figure 3. Network diagram of affiliated journals of cited literature
图 3. 被引文献从属期刊网络图

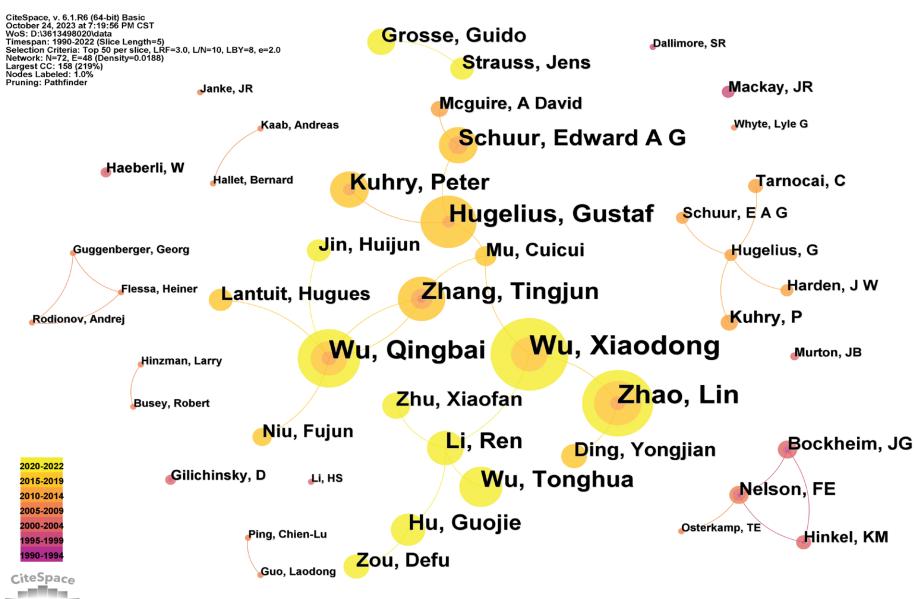


Figure 4. Author collaboration network diagram
图 4. 作者合作网络图

CiteSpace 设置参数 TOP 50 为阈值,筛选出 72 名学者,整体合作关系结构较为松散(Density = 0.0188),但在不同时期形成了以 Wu Xiaodong、Zhao Lin、Wu Qingbai、Hugelius Gustaf、Zhang Tingjun、Wu Tonghua、Hugelius G、Nelson FE 等学者为中心的研究团队(图 4)。其中 Wu Xiaodong、Zhao Lin 之间合作紧密,Wu Tonghua 和 Li Ren 合作成果较多,且近期合作紧密; Hugelius Gustaf 和 Kuhry Peter, Schuur Edward A G 合作紧密。

3.2. 冻土区土壤有机碳研究的主题识别和演变

关键词是对文章内容和中心思想的高度概括和规划整合,通过对关键词进行分析可以更好地了解和掌握冻土区土壤有机碳领域的研究热点,出现频次高且中介中心性值大的关键词能够代表研究领域的热点,通过分析研究热点,能够了解研究领域的关注焦点和发展动向,从而更好地明确研究方向[25]。然而仅仅对关键词的频次和中介中心性进行分析远不能满足研究的需求,因此还需要对关键词进行共现分析,找到关键词之间的联系。如果两个关键词在不同的论文中同时出现的次数越多,说明它们之间的关系越紧密,越能够代表领域的研究主题。在 CiteSpace 界面中节点选择“Keyword”,阈值设定为 Top N = 30 (即从每个片段中选择出现次数排名前 30 的文献),得到关键词共现网络图谱(图 5)。图谱中共包含 119 个节点和 163 条连线,一个节点代表一个关键词,节点中分布颜色代表该关键词出现的年份,同种颜色出现的粗细与该年份关键词出现的频次成正比,节点间的连线表示了各关键词间的共现关系,一篇文献中关键词共线次数越多,则代表这两个主题关系越紧密。从共现网络来看,节点分布较为广泛且分支较多,网络重叠较多,表明该领域的研究内容较为丰富和集中[26]。

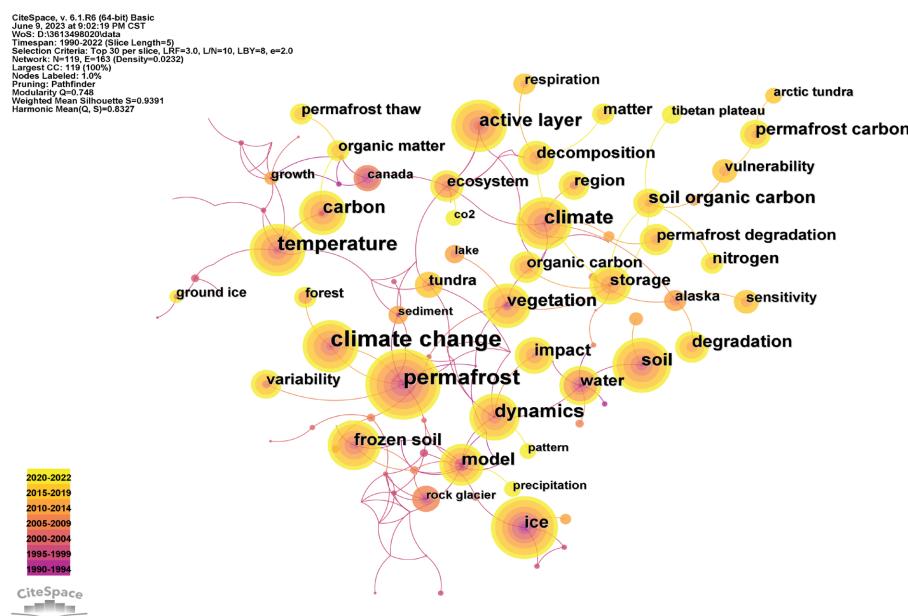


Figure 5. Keyword co-occurrence network graph

图 5. 关键词共现网络图谱

表 2 统计了出现频次排名前二十的关键词的频次、中介中心性值和首发年份,结合表 2 以及关键词共线图谱可以得出, permafrost、climate、dynamics、temperature、soil organic carbon 等与冻土有机质转化机理、气候与温度变化及动力学相关的关键词出现频次较多且中心性值较大,它们可以看作是冻土区土壤有机碳领域重要的研究主题。

Table 2. Top 20 keywords in frequency ranking
表 2. 出现频次排名前二十的关键词

关键词 Keywords	频次 Count	中心性 Centrality	首发年份 First published year
climate change	625	0.03	1995
permafrost	439	0.46	1991
temperature	245	0.13	1997
climate	216	0.41	1996
dynamics	186	0.45	1995
active layer	159	0.07	1995
carbon	142	0.07	2003
soil	130	0.03	1995
soil organic carbon	130	0.2	2010
vegetation	122	0.17	1995
model	117	0.28	1991
ice	106	0.1	1991
permafrost carbon	102	0.03	2011
frozen soil	96	0.03	1991
impact	95	0	2005
degradation	91	0	2010
water	87	0.29	1992
storage	86	0.47	2007
decomposition	78	0.07	2007
nitrogen	78	0	2015

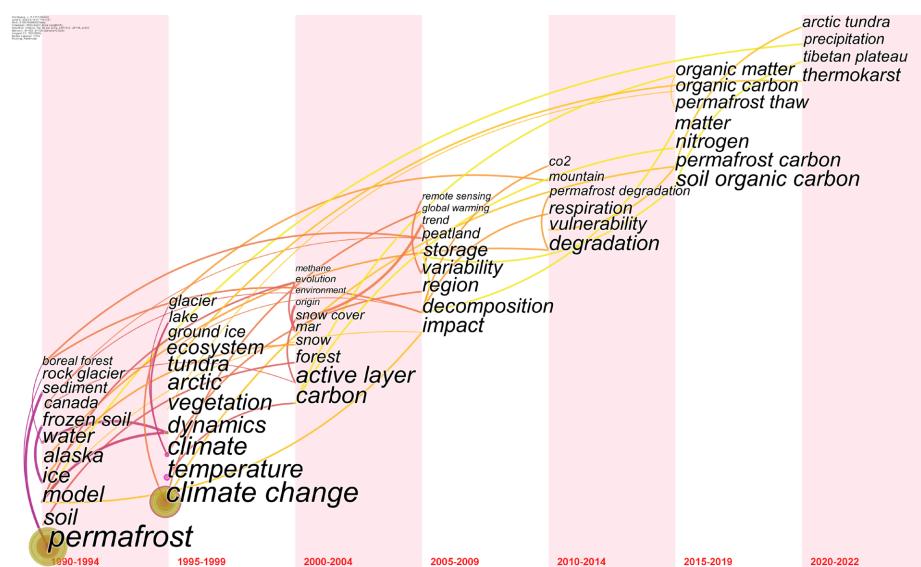


Figure 6. Keyword time zone graph
图 6. 关键词时区图谱

为了能够更加清晰地展示各关键词出现的时间顺序以及它们之间的关联，在关键词共现图谱的基础上，选择“Timezone”进行关键词时区图分析(图6)。从图谱中可以看出，该领域很多重要的高频关键词，如 permafrost、soil、model、ice、water、frozen soil 等大多数都在 1990 年左右甚至是之前就已经开始使用且延续时间较长，说明它们一直以来就是该研究领域不可或缺的部分。随着时间的推移，新出现的关键词逐渐减少，且关键词和中心性频次进一步下降，研究出现分化现象并向多个领域渗透，近十年来，thermokarst、tibetan plateau、soil organic carbon、permafrost carbon、nitrogen、degradation、vulnerability 等关键词逐渐成为新的热点和趋势。

3.2.1. 被引文献分析

论文的被引频次是文献计量学中测度学术论文社会影响力的重要指标。表 3 列出了 Web of Science 数据库中被引频次最高的前 5 篇文献。来自美国的研究者 Schuur 等综述了北极地区的冻土中有机碳的研究。阐明了气候变暖会加速有机碳的微生物分解和温室气体二氧化碳和甲烷的释放。提出在气候变暖的情况下，针对永久冻土有机碳的研究策略[27]。Tarnocai 等研究了北方环极冻土区土壤中的碳库，对北部永久冻土区土壤中碳库的新估计，包括先前分析中未考虑的深层和碳库[28]。瑞典学者 Hugelius 综述了北部环极永久冻土区的土壤和其他松散沉积物在气候变暖后储存的大量的土壤有机碳会减少，但缺乏定量误差估计，因此，研究对土壤 0~3 米深度范围内的永久冻土 SOC 储量以及主要河流三角洲沉积物以及西伯利亚和阿拉斯加叶多马地区 3 米以上沉积物的 SOC 储量进行了修订估计，包括定量不确定性估计[29]。Biskaborn 等综合讨论了永久冻土变暖有可能加剧全球气候变化，因为当冻结的沉积物融化时，会释放土壤有机碳，因此使用来自全球永久冻土地面网络的永久冻土温度时间序列的全球数据集来评估自国际极地年(2007~2009)以来永久冻土地区的温度变化[30]。Ellen Dorrepaal 等测量了气候变暖下的北部泥炭土有机碳储量，研究发现虽然永久冻土融化和泥炭地的干燥可能会进一步增加泥炭的呼吸 5, 13, 30, 但仅基于直接变暖的估计潜在额外全球二氧化碳排放量就足以抵消《京都议定书》为整个欧盟减少温室气体排放的大部分目标(每年 9200 万吨碳) [31]。从以上这些高被引文献可以看出，目前对气候变暖下的北极地区冻土有机碳的研究方面的探讨仍然是研究热点。同时，永久冻土地区的温度变化也引起了学者们的广泛关注。

Table 3. Top 5 cited literature in the field of soil organic carbon in permafrost regions from 1990 to 2022
表 3. 1990~2022 年冻土区土壤有机碳领域被引次数排名前 5 的文献

排名 Rank	题目 Title	年份 Year	作者 Author	机构 Institution	被引次数 Cited times
1	Climate change and the permafrost carbon feedback	2015	Schuur EAG	Northern Arizona University	1871
2	Soil organic carbon pools in the northern circumpolar permafrost region	2009	Tarnocai C	Research Branch, Agriculture and circumpolar Agri-Food Canada	1623
3	Estimated stocks of circumpolar permafrost carbon with quantified uncertainty ranges and identified data gaps	2014	Hugelius G	Stockholm University	916
4	Permafrost is warming at a global scale	2019	Biskaborn BK	Alfred Wegener Institute Helmholtz Centre for Polar and Marine Research	732
5	Carbon respiration from subsurface peat accelerated by climate warming in the subarctic	2009	Ellen Dorrepaal	VU University Amsterdam	501

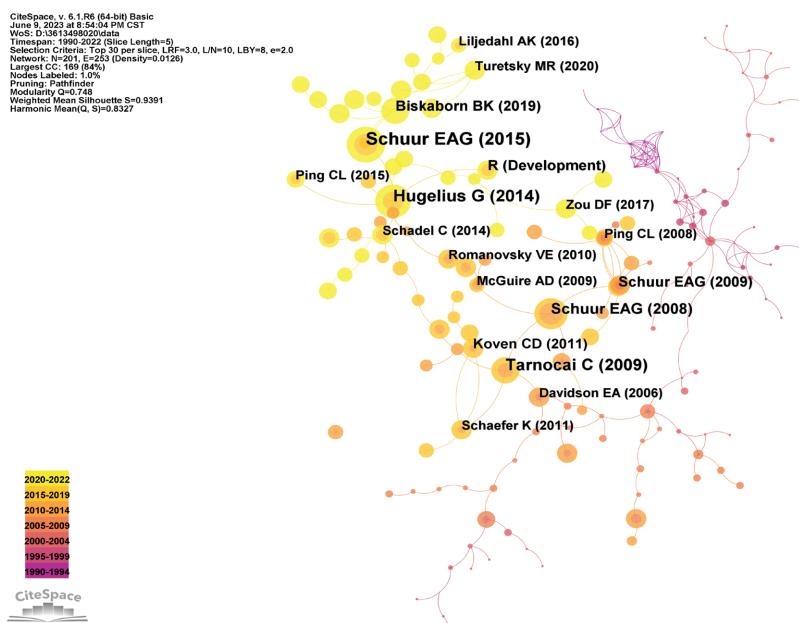


Figure 7. Co-cited distribution of literature on soil organic carbon in permafrost regions from 1990 to 2022
图 7. 1990~2022 年冻土区土壤有机碳领域文献共被引分布

Table 4. Top 5 cited literature in the field of soil organic carbon in permafrost regions from 1990 to 2022
表 4. 1990~2022 年冻土区土壤有机碳领域共被引次数排名前 5 的文献

排名 Rank	题目 Title	年份 Year	作者 Author	国家 Country	共被引次数 Cited times	中心性 Centrality
1	Climate change and the permafrost carbon feedback	2015	Schuur EAG	USA	302	0.24
2	Estimated stocks of circumpolar permafrost carbon with quantified uncertainty ranges and identified data gaps	2014	Hugelius G	Sweden	240	0.4
3	Soil organic carbon pools in the northern permafrost region	2009	Tarnocai C	Canada	184	0.81
4	Permafrost is warming at a global scale	2019	Biskaborn BK	Germany	103	0.08
5	The effect of permafrost thaw on old carbon release and net carbon exchange from tundra	2009	Schuur EAG	USA	100	0.16

文献共被引(Co-citation)是指 2 篇文献共同出现在第 3 篇施引文献目录中。基于文献共被引网络中的关键节点，可以了解到某一研究领域的重要文献和知识库。图 7 显示了本文选择的 201 篇文章被引用的总网络，共有 201 个节点和 253 个连线。每个节点代表一个被引用的文章，节点之间的连线代表共被引关系，连线的颜色表示不同时间。此外，图中节点越大，文献的共被引频次越大，表明它在该领域得到了很好的认可，其相应的文献也具有重要意义。从图中可以看出，共被引次数排名靠前的文献年份不集中，分布在 09、14、15 和 19 年(图 7)，共被引频次前 5 文献中(表 4)，来自美国的学者 Schuur 早在 2009 年就测量了冻土融化下冻土带景观中的净生态系统碳交换和生态系统呼吸的放射性碳 14，以确定有机碳损失对生态系统碳平衡的影响[32]，并且于 2015 年综述了北极地区的冻土中有机碳的研究。阐明了气候变暖会加速有机碳的微生物分解和温室气体二氧化碳和甲烷的释放。提出在气候变暖的情况下，针对永

久冻土有机碳的研究策略[27]。瑞典学者 Hugelius 综述了北部环极永久冻土区的土壤和其他松散沉积物在气候变暖后储存的大量的土壤有机碳会减少，但缺乏定量误差估计，因此，研究对土壤 0~3 米深度范围内的永久冻土 SOC 储量以及主要河流三角洲沉积物以及西伯利亚和阿拉斯加叶多马地区 3 米以上沉积物的 SOC 储量进行了修订估计，包括定量不确定性估计[29]。Tarnocai 等研究了北方环极冻土区土壤中的碳库，对北部永久冻土区土壤中碳库的新估计，包括先前分析中未考虑的深层和碳库[28]。Biskaborn 等综合讨论了永久冻土变暖有可能加剧全球气候变化，因为当冻结的沉积物融化时，会释放土壤有机碳，因此使用来自全球永久冻土地面网络的永久冻土温度时间序列的全球数据集来评估自国际极地年(2007~2009)以来永久冻土地区的温度变化[30]。通过以上共被引最高的文献可以看出，气候变暖下的北极地区冻土有机碳的研究方面近年来成为被关注的热点，永久冻土地区的温度变化具有广阔的发展和应用前景。

3.2.2. 文献关键词聚类分析

CiteSpace 软件能够自动对关键词进行聚类分析，并在此基础上形成聚类标签。基于检索到的文献数据，利用 CiteSpace 软件进行聚类，形成关键标签，以体现冻土区土壤有机碳研究的前沿[31]。关键词聚类分析是在关键词共现的基础上进行的，其目的在于将相似关键词进行归类，着重阐释各关键词聚类标签下，相关作者研究的内容和关注的重点。为了使关键词的聚类结果更加全面且有说服力，本研究参数选取阈值为 TOP30，时间切片设为 5，将检索时间范围内的关键词按照对数似然率算法(LLR)进行提取，运行后得到关键词聚类(见表 5)，图中节点的大小表示关键词的频次，聚类的模块为研究热点，每个聚类由多个紧密相关的词组成，聚类数字越小，该聚类中包含的关键词就越多。

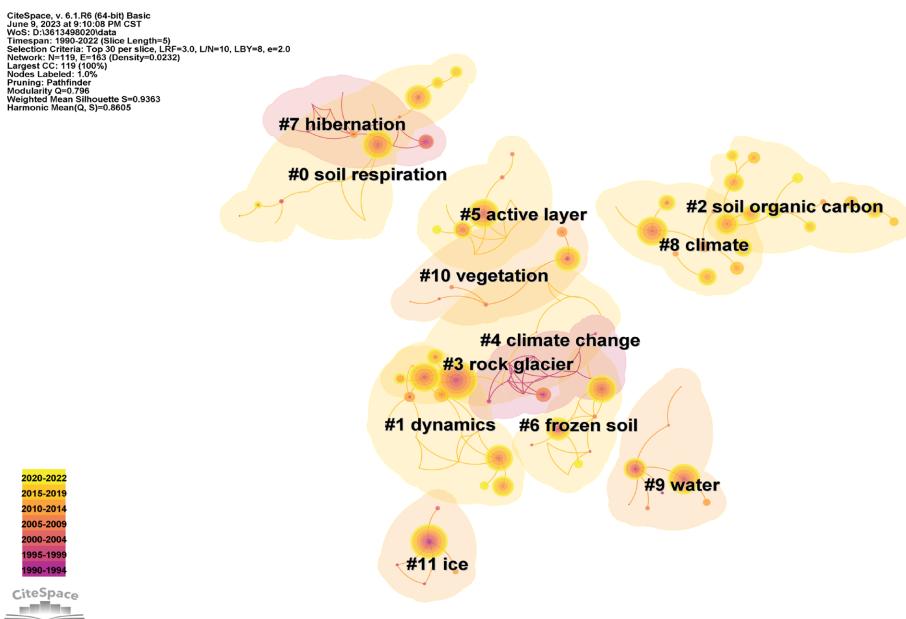


Figure 8. Keyword clustering map of soil organic carbon in permafrost regions

图 8. 冻土区土壤有机碳文献关键词聚类图谱

冻土区土壤有机碳文献关键词聚类图谱如图 8 所示。经计算可知，图 8 的聚类模块值为 $0.796 > 0.3$ ，说明聚类结构显著相关。网络同质性指标值(S)越接近 1，说明同质性越高。经计算可知，S 值大于 0.5，说明关键词的聚类明显且合理。通过分析新基建研究文献关键词聚类表(表 5)可知，关键词从 0~11，包含 15~5 个节点，S 值 1~0.807，说明关键词的聚类主题明确。从表 5 可以观察到，排名第一的聚类标签

(#0)是 soil respiration, 文章数量为 15, S 值为 0.95, 其次是 (#1) dynamics, 有 13 篇文章, S 值为 0.903。其他聚类标签分别在表 5 中列出为: soil organic carbon (12; 1)、rock glacier (11; 0.931)、climate change (10; 0.895)、active layer (10; 0.973)、frozen soil (10; 0.972)、hibernation (9; 1)、climate (9; 0.807)、water (8; 0.917)、vegetation (7; 0.97)、ice (5; 0.883)。

Table 5. Keyword clustering table of research literature on soil organic carbon in permafrost regions

表 5. 冻土区土壤有机碳研究文献关键词聚类表

聚类号	size	s 值	平均年份	聚类内容(LLR 算法)
0	15	0.95	1999	soil respiration (22.44, 1.0E-4); permafrost thaw (16.78, 1.0E-4); ground ice (15.37, 1.0E-4); organic matter (14.51, 0.001); northwest territory (14.51, 0.001)
1	13	0.903	1998	dynamics (25.47, 1.0E-4); impact (19.02, 1.0E-4); massif (14.26, 0.001); swiss alp (9.95, 0.005); soil water content (9.5, 0.005)
2	12	1	2011	soil organic carbon (66.67, 1.0E-4); permafrost carbon (46.25, 1.0E-4); organic carbon (20.83, 1.0E-4); vulnerability (18.78, 1.0E-4); storage (16.34, 1.0E-4)
3	11	0.931	1996	rock glacier (12.29, 0.001); antarctica (9.47, 0.005); rock glaciers (8.76, 0.005); pacific (8.48, 0.005); fluvial sedimentation (8.48, 0.005)
4	10	0.895	1997	climate change (126.79, 1.0E-4); permafrost (28.64, 1.0E-4); siberia (12.37, 0.001); arctic (11.61, 0.001); forest (11.41, 0.001)
5	10	0.973	1999	active layer (32.53, 1.0E-4); ecosystem (14.72, 0.001); northern siberia (9.69, 0.005); gis (9.69, 0.005); ground temperature (9.04, 0.005)
6	10	0.972	1995	frozen soil (38.07, 1.0E-4); model (24.5, 1.0E-4); streamflow (10.44, 0.005); water balance (10.44, 0.005); numerical simulation (10.44, 0.005)
7	9	1	1994	hibernation (15.78, 1.0E-4); lithalsa (15.78, 1.0E-4); survival (15.78, 1.0E-4); northern quebec (12.01, 0.001); lithalsas (12.01, 0.001)
8	9	0.807	2005	climate (30.24, 1.0E-4); permafrost degradation (28.3, 1.0E-4); alaska (21.04, 1.0E-4); sensitivity (20.65, 1.0E-4); degradation (16.33, 1.0E-4)
9	8	0.917	1998	water (33.36, 1.0E-4); soil (19.49, 1.0E-4); climate change (11.61, 0.001); infiltration (10.11, 0.005); water cycle (10.11, 0.005)
10	7	0.97	2000	vegetation (12.5, 0.001); last glacial maximum (11.47, 0.001); late pleistocene (11.47, 0.001); geomorphology (9.25, 0.005); global warming (8.63, 0.005)
11	5	0.883	1998	ice (40.02, 1.0E-4); geology (13.08, 0.001); rock glaciers (10.38, 0.005); shelf (7.69, 0.01); sea (7.69, 0.01)

根据图 8 和表 5 可知, soil respiration (土壤呼吸)是冻土区土壤有机碳研究中最突出的聚类。它包括研究计算了常年冻土中的土壤有机碳(SOC)积累长期影响了土壤碳呼吸速率, 以此表明气候变暖可能会极大地改变残留多年冻土区的碳平衡[32]。排名第二的聚类是 dynamics (动力学), 冻土的一个特征是倾向于形成无颗粒冰透镜体的带状序列, 这些透镜体被冰层渗透的土壤层分隔开, 从而产生冻胀, 为了预测全球变暖下永久冻土退化对工程和环境的影响, 有必要建立适当的动力学模型来描述冻土中的水迁移和冰行为[33]。第三是 soil organic carbon (土壤有机碳), 研究在气候变化的情况下, 冻土中土壤有机碳(SOC)的变化会显著影响陆地碳循环。且土壤有机碳在冻土区的生态环境中占有重要地位; 然而, 研究结果提供冻土区 SOC 的存储和模式的信息, 从而为未来与地球系统模型有关的研究提供了科学依据[34]。第四是 rock glacier (冰石流), 由于气候变暖的趋势, 近年来人们对岩石冰川和冰冻斜坡的加速下滑越来越感兴趣, 研究借鉴冻土力学、岩石力学和混合物力学的相关领域。特别是, 本文试图将一些已知的未冻土壤和岩体力学行为模型扩展到含冰岩体, 并将这些模型应用于变温度和应力条件下冰岩混合物的大规模蠕变和冰岩界面问题[35]。第五是 climate change (气候变化), 全球变暖已经对社会生态系统产生了重大

影响。研究表明，冻土的年平均温度升高，导致永久冻土融化和退化，并降低了季节性冻土的季节性冻结深度[33]。第六是 active layer (活动层)，根据月土壤温度，对两种类型的冻土进行了分类：“永久冻土”(指最大活动层厚度小于 4 米的地区)和“季节性冻土”。在气候变暖的强迫下，预计陆地和地下热液状态在高纬度地区的变化较大。到 2100 年，大约 60% 的永久冻土区将退化为季节性冻土。高纬度地区的大多数地下非饱和土壤每年都会经历冻融循环。活动层的温度变化和水分再分配导致土壤强度下降，从而引发一系列地质和工程问题。提出了一种改进的寒冷地区非饱和冻土热力 - 水力耦合模型，并基于有限元方法编制了相应的计算机程序[36]。第七是 frozen soil (冻土)冻土的一个特征是倾向于形成无颗粒冰透镜体的带状序列，这些透镜体被冰层渗透的土壤层分隔开，从而产生冻胀。在多年冻土中，分离冰引起的地表变形危害工程设施，并对区域水文、生态和气候变化产生重大影响。为了预测全球变暖和冰分离转化下永久冻土退化对工程和环境的影响，需要对冻土中的水迁移和分离冰的形成有一个基本的了解[33]。第八是 hibernation (冬眠)，研究表明在寒冷气候和永久冻土条件下的黑帽土拨鼠冬眠不同阶段心脏活动的动态，环境温度及其波动是决定冬眠成功的主要因素[37]。第九是 climate (气候)，在气候快速变化的情况下，冻土中土壤有机碳(SOC)的动态可能会显著影响陆地碳循环。研究旨在研究冻土中 SOC 的储存、空间格局及其影响因素。估计了 0~3 m 高原冻土(包括永久冻土、季节性冻土和短时间冻土)的 SOC 储量。此外，还分析了植被和气候因素对土壤有机碳密度(SOCD)空间变化的影响[34]。第十是 water (水)，冻土未冻含水量计算模型的评价对数值模拟具有重要意义，研究对寒冷地区水热耦合过程中未冻含水量模型的选择具有重要的参考意义[38]。第十一是 vegetation (植被)，研究旨在研究青藏高原(即地球第三极)冻土中 SOC 的储存、空间格局及其影响因素。归一化差异植被指数和年平均降水量对冻土和季节性冻土 SOC 的空间分布有显著影响。结论高原冻土土壤中含有大量有机碳，这可能受到植物和气候变量的影响。然而，异质地貌可能会使碳在未来的命运更加复杂[34]。第十二是 ice (冰)，在多年冻土中，分离冰引起的地表变形危害工程设施，并对区域水文、生态和气候变化产生重大影响。为了预测全球变暖和冰分离转化下永久冻土退化对工程和环境的影响，有必要建立适当的数学模型来描述冻土中的水迁移和冰行为。在描述冰形成动力学的模型已经成功地预测了分离冰的宏观过程，如刚性冰模型和分离势模型，这些模型得到了广泛的应用和进一步的发展[33]。

由图 8 可以看出，“dynamics (动力学)”自成聚类区域且与其他聚类区域重合，表明该区域涵盖很多不同的主题内容，发布的文献数量较多并具有深入研究的趋势。“rock glacier (冰石流)”聚类区域与“climate change (气候变化)”聚类区域重合较多，说明冰石流的研究总是伴随气候变化同时出现。从表 5 可知，soil respiration (土壤呼吸)存在于各个研究主题之中，由此可见，土壤呼吸是当前冻土区土壤有机碳的研究热点。而“dynamics (动力学)”“rock glacier (冰石流)”“climate change (气候变化)”均从中心向外延伸，且连接线条复杂，说明该领域的研究深度发展迅速，很有可能成为冻土区土壤有机碳研究的新热点。

3.3. 冻土区土壤有机碳研究热点分析

根据 Web of Science 文献突现词分析发现(表 6)，2015~2022 年出现永久冻土融化关键词，而根据时间轴图谱 2015~2019 年冻土区土壤有机碳研究出现研究热点，这说明在冻土区土壤有机碳的研究中，人们开始关注永久冻土融化对冻土区土壤有机碳的影响[39] [40]。

2015~2022 年突现词分别为 thermokarst lake、permafrost thaw、temperature sensitivity、Tibetan plateau、landscape, precipitation. 表明冻土区土壤有机碳的研究集中在热喀斯特湖[41] [42]、永久冻土融化[43]、温度敏感性[44]、青藏高原[45]、景观[46] [47]以及降水量[48]等方面，说明气候变暖对冻土区土壤有机碳的影响受到广泛关注。早期人们关注的研究包括冰川、流动以及他们在积雪环境和湖泊中的影响，突现词

的持续时间较长，说明这一时期这些关键词是受到人们广泛关注，研究活动活跃。而近期关注比较多的是青藏高原冻土区土壤有机碳、在特定景观或地形下的冻土区土壤有机碳以及降水量增加对冻土区土壤有机碳的影响，其中关键词 Tibetan Plateau 突现强度高达 13.32，这可能是因为冻土区土壤有机碳的研究中，青藏高原生态环境脆弱，是大面积的连续多年冻土分布区，更是对全球气候变暖响应最为敏感地区，青藏高原冻土区土壤有机碳储量影响等方面的研究是潜在的研究转折点。

Table 6. List of emerging words in literature analysis
表 6. 文献分析突现词表



4. 结论

本文利用 CiteSpace 软件对 1990~2022 年 Web of Science 数据库中冻土区土壤有机碳研究领域的 2600 篇文献进行了可视化分析，从发文量、国家(地区)和机构发文数与合作情况、期刊共被引、研究热点、研究趋势等方面定量分析了冻土区土壤有机碳研究现状与热点，得出如下结论。

- 1) 冻土区土壤有机碳领域的发文量逐年增加，美国、中国和加拿大是该领域发表文献量前 3 的国家；近年来我国在该领域迅速发展，中国科学院是发文量最多的机构，说明我国在该领域研究发展迅速，已成为科研工作者关注的热点内容之一，但同时也还存在文章影响力较低的问题，在该研究领域国际间的科研交流合作方面我国研究者和他国研究者合作较少，须加强国际间的合作交流，同时建立冻土区土壤有机碳长期监测网络；Schuur、Tarnocai、Hugelius、Biskaborn、Ellen Dorrepaal 等的文章不仅被引频次

多且与其他文献相互交叉，说明这些文献具有重要的研究价值。在对研究热点进行分析时发现，“soil respiration (土壤呼吸)”、“dynamics (动力学)”、“soil organic carbon (土壤有机碳)”、“rock glacier (冰石流)”、“climate change (气候变化)”等有关冻土区土壤有机碳机理及动力学的研究属于该领域的重要研究主题。而近几年来，该领域逐渐关注 rock glacier (冰石流)、climate change (气候变化) 及 active layer (活动层) 对冻土区土壤有机碳的影响。

2) 未来冻土区土壤有机碳的研究应侧重于青藏高原冻土区土壤有机碳；特定景观或地形下的冻土区土壤有机碳以及降水量增加对冻土区土壤有机碳的影响等内容。

参考文献

- [1] 王冰, 周扬, 张秋良. 兴安落叶松林龄对土壤团聚体分布及其有机碳含量的影响[J]. 生态学杂志, 2021, 40(6): 1618-1628.
- [2] Schlesinger, W.H. (1997) Biogeochemistry: An Analysis of Global Change. Academic Press, New York.
- [3] Hugelius, G., Strauss, J., Zubrzycki, S., Harden, J.W., Schuur, E.A.G., Ping, C., et al. (2014) Estimated Stocks of Circumpolar Permafrost Carbon with Quantified Uncertainty Ranges and Identified Data Gaps. *Biogeosciences*, **11**, 6573-6593. <https://doi.org/10.5194/bg-11-6573-2014>
- [4] Chen, Y., Liu, F., Kang, L., Zhang, D., Kou, D., Mao, C., et al. (2021) Large-Scale Evidence for Microbial Response and Associated Carbon Release after Permafrost Thaw. *Global Change Biology*, **27**, 3218-3229. <https://doi.org/10.1111/gcb.15487>
- [5] Barrios, E., Buresh, R.J., Kwasiga, F. and Sprent, J.I. (1997) Light Fraction Soil Organic Matter and Available Nitrogen Following Trees and Maize. *Soil Science Society of America Journal*, **61**, 826-831. <https://doi.org/10.2136/sssaj1997.03615995006100030016x>
- [6] 倪杰, 吴通华, 赵林, 等. 北极多年冻土区碳循环研究进展与展望[J]. 冰川冻土, 2019, 41(4): 845-857.
- [7] Li, Y.Q., Zhao, H.L. and Chen, Y.P. (2005) Advance in the Study of Terrestrial Ecosystem Carbon Source, Sink and Affection Mechanisms. *Chinese Journal of Ecology*, **24**, 37-42.
- [8] Mu, C., Zhang, T., Zhao, Q., Su, H., Wang, S., Cao, B., et al. (2017) Permafrost Affects Carbon Exchange and Its Response to Experimental Warming on the Northern Qinghai-Tibetan Plateau. *Agricultural and Forest Meteorology*, **247**, 252-259. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2017.08.009>
- [9] 康世昌, 黄杰, 牟翠翠, 等. 冰冻圈化学: 解密气候环境和人类活动的指纹[J]. 中国科学院院刊, 2020, 35(4): 456-465.
- [10] 张超飞, 马素萍, 何晓波, 汪少勇. 长江源多年冻土区土壤有机碳分布特征及其影响因素[J]. 生态学杂志, 2022, 41(9): 1665-1673.
- [11] 曹樱子, 王小丹. 藏北高寒草原样带土壤有机碳分布及其影响因素[J]. 生态环境学报, 2012, 21(2): 213-219.
- [12] 程国栋, 赵林, 李韧, 等. 青藏高原多年冻土特征、变化及影响[J]. 科学通报, 2019, 64(27): 2783-2795.
- [13] 叶深溪, 许为民. 文献计量学在科研评价中的应用进展[J]. 图书馆论坛, 2003, 23(4): 12-14.
- [14] 刘彩霞, 方必基. 2011-2020 年中国结核病研究文献计量学分析[J]. 现代预防医学, 2021, 48(14): 2520-2523, 2551.
- [15] 高懋芳, 邱建军, 刘三超, 刘宏斌, 王立刚, 逢焕成. 基于文献计量的农业面源污染研究发展态势分析[J]. 中国农业科学, 2014, 47(6): 1140-1150.
- [16] 盛春蕾, 吕宪国, 尹晓敏, 闫长平. 基于 Web of Science 的 1899-2010 年湿地研究文献计量分析[J]. 湿地科学, 2012, 10(1): 92-101.
- [17] 冯筠, 郑军卫. 基于文献计量学的国际遥感学科发展态势分析[J]. 遥感技术与应用, 2005, 20(5): 526-530.
- [18] 刘杏梅, 赵健, 徐建明. 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[J]. 土壤学报, 2021, 58(2): 445-455.
- [19] 张维荣, 严康, 汪海珍, 等. 基于 1983-2019 年文献计量对多环芳烃降解基因研究及进展的剖析[J]. 环境科学学报, 2020, 40(3): 1138-1148.
- [20] Chen, C. (2005) Citespace II: Detecting and Visualizing Emerging Trends and Transient Patterns in Scientific Literature. *Journal of the American Society for Information Science and Technology*, **57**, 359-377. <https://doi.org/10.1002/asi.20317>

- [21] 李忠义, 韦彩会, 何铁光, 等. 基于学科知识图谱的紫云英研究态势分析[J]. 中国农机化学报, 2020, 41(7): 207-214.
- [22] Li, H.C., Crabbe, M.J. and Chen, H. (2020) History and Trends in Ecological Stoichiometry Research from 1992 to 2019: A Scientometric Analysis. *Sustainability*, **12**, Article No. 8909. <https://doi.org/10.3390/su12218909>
- [23] Wei, F., Grubesic, T.H. and Bishop, B.W. (2015) Exploring the GIS Knowledge Domain Using Citespace. *The Professional Geographer*, **67**, 374-384. <https://doi.org/10.1080/00330124.2014.983588>
- [24] Gao, H., Ding, X. and Wu, S. (2020) Exploring the Domain of Open Innovation: Bibliometric and Content Analyses. *Journal of Cleaner Production*, **275**, Article ID: 122580. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122580>
- [25] 李文元, 王平. 基于 CiteSpace 的我国顾客参与研究可视化分析[J]. 电子商务, 2020(2): 35-37.
- [26] 柴海燕, 王璐, 任秋颖. 国家公园型保护地管理研究述评—基于科学计量及知识图谱分析[J]. 生态经济, 2019, 35(12): 96-101.
- [27] Schuur, E.A.G., McGuire, A.D., Schädel, C., Grosse, G., Harden, J.W., Hayes, D.J., et al. (2015) Climate Change and the Permafrost Carbon Feedback. *Nature*, **520**, 171-179. <https://doi.org/10.1038/nature14338>
- [28] Tarnocai, C., Canadell, J.G., Schuur, E.A.G., Kuhry, P., Mazhitova, G. and Zimov, S. (2009) Soil Organic Carbon Pools in the Northern Circumpolar Permafrost Region. *Global Biogeochemical Cycles*, **23**, GB2023. <https://doi.org/10.1029/2008gb003327>
- [29] Hugelius, G., Strauss, J., Zubrzycki, S., Harden, J.W., Schuur, E.A.G., Ping, C., et al. (2014) Estimated Stocks of Circumpolar Permafrost Carbon with Quantified Uncertainty Ranges and Identified Data Gaps. *Biogeosciences*, **11**, 6573-6593. <https://doi.org/10.5194/bg-11-6573-2014>
- [30] Biskaborn, B.K., et al. (2019) Permafrost Is Warming at a Global Scale. *Nature Communications*, **10**, Article No. 264.
- [31] 陈悦, 陈超美, 胡志刚, 等. 引文空间分析原理与应用 CiteSpace 实用指南[M]. 北京: 科技出版社, 2014.
- [32] Mu, C., Wu, X., Zhao, Q., Smoak, J.M., Yang, Y., Hu, L., et al. (2017) Relict Mountain Permafrost Area (Loess Plateau, China) Exhibits High Ecosystem Respiration Rates and Accelerating Rates in Response to Warming. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, **122**, 2580-2592. <https://doi.org/10.1002/2017jg004060>
- [33] Fu, Z., Wu, Q., Zhang, W., He, H. and Wang, L. (2022) Water Migration and Segregated Ice Formation in Frozen Ground: Current Advances and Future Perspectives. *Frontiers in Earth Science*, **10**, Article ID: 826961. <https://doi.org/10.3389/feart.2022.826961>
- [34] Jiang, L., Chen, H., Zhu, Q., Yang, Y., Li, M., Peng, C., et al. (2018) Assessment of Frozen Ground Organic Carbon Pool on the Qinghai-Tibet Plateau. *Journal of Soils and Sediments*, **19**, 128-139. <https://doi.org/10.1007/s11368-018-2006-3>
- [35] Toride, N., Watanabe, K. and Hayashi, M. (2013) Special Section: Progress in Modeling and Characterization of Frozen Soil Processes. *Vadose Zone Journal*, **12**, 1-4. <https://doi.org/10.2136/vzj2013.01.0001>
- [36] Chen, Y., Lai, Y., Li, H. and Pei, W. (2022) Finite Element Analysis of Heat and Mass Transfer in Unsaturated Freezing Soils: Formulation and Verification. *Computers and Geotechnics*, **149**, Article ID: 104848. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2022.104848>
- [37] Vasil'ev, V.N. (2000) Specific Features of Hibernation in the Black-Capped Marmot (*Marmota camtschatica*) from Yakutia. *Zoologichesky Zhurnal*, **79**, 1114-1123.
- [38] Jiang, L., Chen, H., Zhu, Q., Yang, Y., Li, M., Peng, C., et al. (2018) Assessment of Frozen Ground Organic Carbon Pool on the Qinghai-Tibet Plateau. *Journal of Soils and Sediments*, **19**, 128-139. <https://doi.org/10.1007/s11368-018-2006-3>
- [39] Abbott, B.W. and Jones, J.B. (2015) Permafrost Collapse Alters Soil Carbon Stocks, Respiration, CH₄, and N₂O in Upland Tundra. *Global Change Biology*, **21**, 4570-4587. <https://doi.org/10.1111/gcb.13069>
- [40] Treat, C.C., Wollheim, W.M., Varner, R.K. and Bowden, W.B. (2016) Longer Thaw Seasons Increase Nitrogen Availability for Leaching during Fall in Tundra Soils. *Environmental Research Letters*, **11**, Article ID: 064013. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/11/6/064013>
- [41] Deshpande, B.N., Maps, F., Matveev, A. and Vincent, W.F. (2017) Oxygen Depletion in Subarctic Peatland Thaw Lakes. *Arctic Science*, **3**, 406-428. <https://doi.org/10.1139/as-2016-0048>
- [42] Joss, H., Patzner, M.S., Maisch, M., Mueller, C.W., Kappler, A. and Bryce, C. (2022) Cryoturbation Impacts Iron-Organic Carbon Associations along a Permafrost Soil Chronosequence in Northern Alaska. *Geoderma*, **413**, Article ID: 115738. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2022.115738>
- [43] Koven, C.D., Lawrence, D.M. and Riley, W.J. (2015) Permafrost Carbon-Climate Feedback Is Sensitive to Deep Soil Carbon Decomposability but Not Deep Soil Nitrogen Dynamics. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, **112**, 3752-3757. <https://doi.org/10.1073/pnas.1415123112>

-
- [44] Lu, B., Song, L., Zang, S. and Wang, H. (2022) Warming Promotes Soil CO₂ and CH₄ Emissions but Decreasing Moisture Inhibits CH₄ Emissions in the Permafrost Peatland of the Great Xing'an Mountains. *Science of the Total Environment*, **829**, Article ID: 154725. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.154725>
 - [45] Li, J., Yan, D., Pendall, E., Pei, J., Noh, N.J., He, J., et al. (2018) Depth Dependence of Soil Carbon Temperature Sensitivity across Tibetan Permafrost Regions. *Soil Biology and Biochemistry*, **126**, 82-90. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2018.08.015>
 - [46] Lininger, K.B., Wohl, E., Rose, J.R. and Leisz, S.J. (2019) Significant Floodplain Soil Organic Carbon Storage along a Large High-Latitude River and Its Tributaries. *Geophysical Research Letters*, **46**, 2121-2129. <https://doi.org/10.1029/2018gl080996>
 - [47] Lim, A.G., Sonke, J.E., Krickov, I.V., Manasypov, R.M., Loiko, S.V. and Pokrovsky, O.S. (2019) Enhanced Particulate Hg Export at the Permafrost Boundary, Western Siberia. *Environmental Pollution*, **254**, Article ID: 113083. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.113083>
 - [48] Wang, Q., Lv, W., Li, B., Zhou, Y., Jiang, L., Piao, S., et al. (2020) Annual Ecosystem Respiration Is Resistant to Changes in Freeze-Thaw Periods in Semi-Arid Permafrost. *Global Change Biology*, **26**, 2630-2641. <https://doi.org/10.1111/gcb.14979>