

基于文献计量的冻土微生物研究态势分析

江云兵¹, 吴松², 杨立宾^{*1,3}, 周甜¹, 杜君³, 刘永志³

1 黑龙江省科学院自然与生态研究所, 黑龙江 哈尔滨 150040

2 黑龙江省科学技术情报研究院, 黑龙江 哈尔滨 150028

3 黑龙江呼中国家级自然保护区, 黑龙江 呼中 165038

江云兵, 吴松, 杨立宾, 周甜, 杜君, 刘永志. 基于文献计量的冻土微生物研究态势分析[J]. 微生物学通报, 2022, 49(6): 2388-2402

Jiang Yunbing, Wu Song, Yang Libin, Zhou Tian, Du Jun, Liu Yongzhi. Research trend of permafrost microorganisms based on bibliometrics[J]. Microbiology China, 2022, 49(6): 2388-2402

摘要:【背景】全球气候变暖导致的冻土融化加速了微生物对土壤有机碳的降解, 产生的温室气体在一定程度上加剧了温室效应, 对全球气候变化形成正反馈作用。【目的】本文针对国内外冻土微生物研究的热点和发展趋势进行分析比较, 旨在归纳、总结并为今后该领域的研究和发展提供参考和依据。【方法】利用 Web of Science 核心合集数据库和 CNKI 数据库检索, 运用 BIBExcel 软件生成高频关键词的共词矩阵, 使用 UCINET 和 NetDraw 软件完成高频词的网络可视化图谱, 并通过 SPSS 软件实现高频词的聚类分析。【结果】共检索到与冻土微生物相关的国内外文献 839 篇, 其中国外文献 713 篇、中文文献 126 篇, 国外的发文量和增长率显著高于国内。从高频关键词和共现网络视图上看, 国外偏重气候变化、温室气体及微生物群落变化之间的作用关系研究, 而国内更偏向于冻土微生物多样性的研究。聚类分析表明, 国外研究主要以微生物对有机碳的降解作用及对冻土区乃至全球的影响为主, 此外还涉及以冻土微生物为研究对象的火星生命的探究。国内研究主要以冻土微生物多样性、甲烷排放和微生物对污染的降解作用为重点。【结论】国内外对于冻土微生物的研究态势存在异同点, 尽管国外的研究体系和知识结构明显优于国内, 但气候变暖对冻土微生物在温室气体排放方面的影响已成为现阶段国内外共同的研究热点。

关键词: 冻土; 微生物; 温室气体; 文献计量

基金项目: 中央引导地方科技发展专项(ZY20B15); 黑龙江省财政专项(ZNJZ2020ZR01); 黑龙江省科学院双提雁阵特别计划(YZ202003)

Supported by: Special Project of the Central Government to Guide Local Science and Technology Development (ZY20B15); Financial Special Project of Heilongjiang Province (ZNJZ2020ZR01); Research Quality Enhance Special Project of Heilongjiang Academy of Sciences (YZ202003)

***Corresponding author:** E-mail: 13664600518@139.com

Received: 2021-10-10; **Accepted:** 2022-01-20; **Published online:** 2022-02-24

Research trend of permafrost microorganisms based on bibliometrics

JIANG Yunbing¹, WU Song², YANG Libin^{*1,3}, ZHOU Tian¹, DU Jun³, LIU Yongzhi³

1 Institute of Natural Resources and Ecology, Heilongjiang Academy of Sciences, Harbin 150040, Heilongjiang, China

2 Institute of Scientific and Technical Information of Heilongjiang Province, Harbin 150028, Heilongjiang, China

3 Heilongjiang Huzhong National Nature Reserve, Huzhong 165038, Heilongjiang, China

Abstract: [Background] The thawing of permafrost caused by global warming accelerates the degradation of soil organic carbon by microorganisms, and the generated greenhouse gases will exacerbate the greenhouse effect to some extent, forming a positive feedback effect on global climate change. [Objective] To compare the research hotspots and trends of permafrost microorganisms at home and abroad, and thus provide a basis for the research and development of this field in the future. [Methods] The relevant literature was searched from Web of Science Core Collection and CNKI. BIBExcel was employed to generate the co-word matrix of high-frequency keywords, and the network of high-frequency words was visualized with UCINET and NetDraw. The clustering analysis of high-frequency words was performed in SPSS. [Results] A total of 839 papers related to permafrost microorganisms were retrieved, including 713 in English and 126 in Chinese. The number of papers published in English and its growth rate were significantly higher than those in Chinese. According to the high-frequency keywords and co-occurrence networks, foreign research focused on the relationship between climate change, greenhouse gases, and microbial community changes, while the Chinese on microbial diversity in permafrost areas. The clustering analysis demonstrated that the papers published in English mainly involved the degradation of organic carbon by microorganisms and its impact on permafrost areas and even the world. In addition, the Martian life with permafrost microorganisms as the research object has been explored. The studies published in Chinese mainly concerned microbial diversity, methane emissions, and microbial degradation of pollutants in permafrost. [Conclusion] The research situation of permafrost microorganisms has both similarities and differences at home and abroad. Although other countries have better research systems and knowledge structures than China, the greenhouse gas emissions of permafrost microorganisms caused by warming have become a common research hotspot at home and abroad.

Keywords: permafrost; microorganisms; greenhouse gases; bibliometrics

冻土是指温度处于 0 °C 或以下并含有冰的各种岩石和土壤^[1], 广泛分布于高纬度和高海拔的寒区, 对气候的变化极为敏感^[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 1 100–1 500 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]。气候变化专门委员会(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)曾指出, 21 世纪末全球气温将比工业化以前升高 1.1–6.4 °C, 而高纬度、高海拔地区增温可能会更加明显^[5]。气候变暖已经对自然资源造成了一定的威胁, 事实

证明全球范围内冻土退化现象十分明显^[6-9]。鉴于土壤微生物在调节陆地生物地球化学循环中的关键作用,近年来对冻土土壤微生物的研究也越来越受到关注^[10-13]。研究发现,升温刺激了微生物的活性和土壤活动层的呼吸,加速了冻土区有机质的分解,进而释放出大量的温室气体,正反馈于气候变暖^[14-15]。

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^[16],广泛应用于各学科领域^[17-20]。尽管国内外十分重视对微生物的研究,也已取得了许多的成果,但是基于文献计量学的微生物研究分析屈指可数。仝婧婧等将文献计量法应用于 Web of Science 数据库中的土壤微生物修复的定量分析^[21];李雅等将其用于土壤有机碳和土壤微生物多样性的前沿态势分析^[22]。然而目前仍未出现利用文献计量法定量分析冻土微生物的研究,在全球气温升高的背景下,对冻土微生物的文献计量分析有助于揭示该领域的发展趋势和研究热点,对后续的科研具有重要的指导意义。

本文以 Web of Science 和中国知网(CNKI)作为国内外数据库检索冻土微生物相关研究文献,在文献计量的分析基础上,运用 UCINET、NetDraw 和 SPSS 等软件对高频关键词进行可视化网络视图和聚类分析,进而总结出该领域的发展趋势和研究热点,以期对冻土微生物的研究提供研究热点和方向引导。

1 材料与方法

1.1 材料

国外方面,以 Web of Science 数据库中的 Web of ScienceTM 核心合集为数据源,高级检索

式为“TS=[(“permafrost*” OR “frozen soil*” OR “frozen ground*” OR “freezing soil*” OR “frost soil*”) AND (microorganism* OR microb*)]”,搜索年份为 1999–2020 年,选择“Article”文献类型,经手动筛选得到文献 713 篇。国内方面,以中国知网(CNKI)为数据源,高级检索主题为“冻土和微生物”,搜索年份同样为 1999–2020 年,通过对文献篇名和摘要内容相关性甄别,共筛选出 126 篇文献。

1.2 方法

将筛选的国外 713 篇文献和国内 126 篇文献导入 BIBExcel,根据普莱斯定律,高频关键词计算公式为 $M_k = 0.749 \times \sqrt{N_{\max}}$,其中 M_k 为关键词阈值, N_{\max} 为关键词的最高频词^[23]。国外文献频率大于 10 的高频关键词共 38 个,国内文献频率大于 3 的高频关键词共有 27 个,利用 BIBExcel 将国外和国内文献选取的高频关键词分别生成并导出 38×38 和 27×27 的共现矩阵。运用 UCINET 将 2 个矩阵分别生成“###h”文件,随后在 NetDraw 中绘制国外和国内文献高频关键词的共现网络视图。最后分别将 38×38 和 27×27 的共现矩阵导入 SPSS 中,对高频关键词进行聚类分析,并生成聚类树状图。

2 结果与分析

2.1 相关文献发文量分析

1999–2020 年间国外冻土微生物文献发文量的变化(图 1),可将冻土微生物研究分为 3 个阶段。第一阶段为探索阶段(1999–2006 年),该时间段发文数量较少且出现回落现象,可能与当时的研究手段、经验尚浅及重视度较低有关。第二阶段为波动增长阶段(2007–2013 年),发文量较第一阶段有明显的增加,年平均发文量为 22.29 篇。这可能与 2007 年第 4 次 IPCC 评估报告有关^[24],报告发布后国际社会对冻土领域

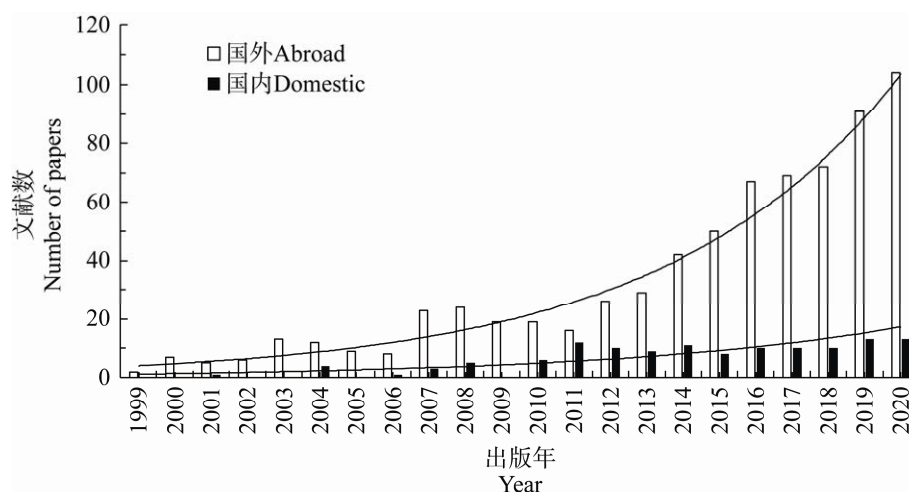


图1 国内外冻土微生物研究领域文献发文量

Figure 1 Number of papers in the field of permafrost microorganisms in domestic and abroad.

的研究逐渐重视起来。第三阶段为加速增长阶段(2014–2020年),该阶段共发文495篇,占总发文量的69.42%,年均发文量为70.71篇,该阶段恰逢“IPCC第5次评估报告”发布,报告指出随着气温的不断升高,海平面上升加快,积雪厚度减少,冻土融化加深,温室气体排放速率增加,高寒生态系统加速退化^[25]。因此,学术界可能再度提高了对冻土微生物群落及碳氮循环相关研究的重视。

如图1所示,从CNKI筛选的126篇文献可分为2个阶段。第一阶段为萌芽阶段(2001–2010年),该阶段的研究发文量少,发文时间不连续,共发表20篇文献。第二阶段为波动增长阶段(2011–2020年),共发表106篇文献,年均发文量为10.6篇。此外,从图1可以发现,国内外对“冻土微生物”的研究整体偏少,但发文数量却具有上升的趋势;国外的研究已进入加速增长阶段,而我国国内的文献数量与国外差距较大,增加趋势也更小,目前可能仍处于探索前进的状态。

2.2 高频关键词分析

关键词能对文献内容进行高度概括和总

结,一个研究领域不同阶段的全部文献关键词可以反映出该领域的研究趋势和热点^[26-27]。如表1所示,频次较高的关键词为永久冻土(permafrost)、北极(Arctic)、气候变化(climate change)、甲烷(methane)、微生物群落(microbial communities)、二氧化碳(carbon dioxide)、苔原(tundra)、火星(mars)等。总体上看,国外文献中高频关键词涉及气候变化、温室气体、微生物群落变化甚至与火星生命探究有关,研究内容倾向于气候变暖引起冻土退化、微生物群落的调控作用及二氧化碳和甲烷等温室气体排放之间的研究。如表2所示,国内文献中频次较高的关键词为青藏高原、冻土、多年冻土、微生物、16S rRNA基因、微生物群落结构等。由此可见,国内外在冻土微生物的研究内容上存在差异,国外侧重于在气候变化条件下冻土微生物群落结构的动态变化与其介导的温室气体排放之间的关系,而国内更倾向于冻土的不同环境条件对微生物多样性的影响且分别集中在北极和青藏高原地区。

对于不同的研究阶段,通过分析高频关键词的出现频次可得出各阶段的研究热点。根据上文划分的3个阶段,利用BIBExcel提取国外

表 1 国外冻土微生物研究高频关键词及其频次

Table 1 High-frequency keywords and frequency of permafrost microorganisms research abroad

高频关键词	频次	高频关键词	频次
High-frequency keywords	Frequency	High-frequency keywords	Frequency
Permafrost	214	Active layer	17
Arctic	56	Dissolved organic matter	17
Climate change	40	Permafrost thaw	16
Methane	39	Soil	16
Microbial communities	36	Bacterial diversity	16
Carbon dioxide	33	Soil organic matter	15
Tundra	31	Soil respiration	14
Mars	31	Thermokarst	14
Climate warming	26	Soil organic carbon	14
Astrobiology	24	Boreal forest	14
Tibetan Plateau	23	Microorganisms	14
Bacteria	20	Nitrification	13
Carbon cycling	20	Microbial diversity	12
Methanogens	19	Metagenomics	12
Carbon	19	Nitrous oxide	12
Antarctica	18	Peatlands	12
Microbial biomass	17	Methanogenesis	11
Microbial ecology	17	16S rRNA	11
Frozen soils	17	Dissolved organic carbon	11

表 2 国内冻土微生物研究高频关键词及其频次

Table 2 High-frequency keywords and frequency of permafrost microorganisms research in domestic

高频关键词	频次	高频关键词	频次	高频关键词	频次
High-frequency keywords	Frequency	High-frequency keywords	Frequency	High-frequency keywords	Frequency
青藏高原	29	祁连山	7	微生物数量	4
Tibetan Plateau		Qilian mountains		Microbial quantity	
冻土	26	土壤微生物	6	石油污染	4
Frozen soils		Soil microorganisms		Oil pollution	
多年冻土	15	多样性	6	土壤	4
Permafrost		Diversity		Soil	
微生物	14	甲烷	5	产甲烷菌	4
Microorganisms		Methane		Methanogens	
16S rRNA 基因	13	细菌多样性	5	可培养细菌	4
16S rRNA gene		Bacterial diversity		Culturable bacteria	
微生物群落结构	11	低温微生物	5	甲烷氧化菌	4
Microbial community structure		Cold adapted microorganisms		Methane oxidative bacteria	
天然气水合物	10	细菌群落	5	可培养微生物	4
Gas hydrate		Bacterial communities		Culturable microorganisms	
微生物多样性	8	冻融作用	5	多相分类学	4
Microbial diversity		Freeze-thaw process		Polyphasic taxonomy	
高通量测序	8	冻融循环	4	环境因子	4
High-throughput sequencing		Freezing-thawing cycle		Environmental factors	

冻土微生物文献前 10 位的高频关键词, 由于国内文献较少, 分阶段研究意义不大, 因此只对国外文献进行分析。由表 3 可知: (1) 永久冻土(permafrost)和北极(Arctic)等始终处于各阶段的前列, 说明冻土微生物研究主要围绕永久冻土展开, 而对北极冻土地带的研究一直保持较高的热度; (2) 与探索阶段相比, 随着波动增长阶段中气候变化以及加速增长阶段中气候变化和气候变暖的出现, 全球气候变化已经成为冻土微生物研究的重要影响因子, 气候变暖对该研究领域的影响仍然是当下和未来研究的重心; (3) 甲烷(methane)和二氧化碳(carbon dioxide)关键词频次的上升, 全球气候变暖已是不争的事实, 而冻土退化区域温室气体排放加剧也得到了证实, 因此, 对冻土区微生物介导的温室气体排放的研究是过去一段时间也是今后重要的研究内容; (4) 对于火星生命探索研究的关键词频次排名呈现先增后减的趋势, 最新阶段内天体生物学(Astrobiology)的频次未进前 10, 说明对火星生命探究方面关键词的增长率低于其他研究方面, 而在航天技术快速发展的时代利用地球冻土来探究火星生命的研究主题是否要继续保

持高热度仍需要进一步探讨。综合来看, 国外冻土微生物不同研究阶段的热点存在差异, 对火星生命探究的高热度逐渐向冻土碳循环转移, 冻土区域微生物与气候变化互作下的温室气体排放已经成为当下土壤微生物的主流研究。

2.3 高频关键词的共现可视化分析

关键词共现可视化分析能显示文献中的关键词共现情况, 即能利用研究文献中关键词同时出现的次数来探讨关键词之间的联系^[28-29]。网络可视化图中的节点代表高频关键词, 节点越大说明该关键词出现的次数越多, 两个节点之间的连线越粗, 说明这两个关键词一起出现的次数越多、关系越密切^[30]。

从图 2 可以看出, 国外文献中冻土微生物关键词共现网络视图节点较大的关键词有永久冻土(permafrost)、北极(Arctic)、苔原(tundra)、气候变化(climate change)、甲烷(methane)等, 说明这些词出现的次数较多, 而这些节点相关的连线也突出了当下冻土微生物研究关注点之间的联系, 一定程度上说明该领域的研究热点与气候变化、碳转化和微生物之间紧密相关。国内文献共现网络视图如图 3 所示, 由于检索

表 3 国外冻土微生物各研究阶段频次前 10 位的关键词

Table 3 The top 10 frequency keywords of permafrost microorganisms in every period abroad

探索阶段(1999–2006 年)		波动增长阶段(2007–2013 年)		加速增长阶段(2014–2020 年)	
Exploratory phase		Fluctuating growth phase		Accelerated growth phase	
高频关键词	频次	高频关键词	频次	高频关键词	频次
High-frequency keywords	Frequency	High-frequency keywords	Frequency	High-frequency keywords	Frequency
Permafrost	18	Permafrost	34	Permafrost	162
Arctic	6	Climate change	11	Arctic	44
Microorganisms	4	Mars	10	Methane	30
Mars	4	Microbial communities	9	Carbon dioxide	30
Exiguobacterium	3	Astrobiology	9	Climate change	28
Low temperature	3	Frozen soils	9	Microbial communities	26
Soil	3	Nitrification	7	Tundra	26
Water brines	3	Methane	7	Climate warming	23
Viable microorganisms	3	Microbial diversity	7	Carbon	18
Astrobiology	2	Arctic	6	Mars	17

Tel: 010-64807511; E-mail: tongbao@im.ac.cn; <http://journals.im.ac.cn/wswxtbcn>

到的国内文献数量远少于国外, 导致关键词的共现次数相差较大, 共现网络视图中节点数和连线密度都小于国外。青藏高原、冻土、多年冻土、16S rRNA 基因、微生物、高通量测序、微生物多样性等的节点较大, 相关节点的连线较粗。可初步认为国内冻土微生物的研究与青藏高原冻土区密切相关, 并且研究内容主要围绕冻土微生物多样性开展, 由于国内文献较少, 共现网络可能存在偏差。此外, 环境因子和细菌群落与其他较大节点以及甲烷菌与产甲烷菌等之间的连线较粗, 说明这类词两两同时出现的次数较多, 两词的联系较为紧密。

2.4 高频关键词聚类分析

聚类分析是按照选取的方法利用变量因子之间的距离对其进行归类, 从而判断选取变量因子之间的亲疏程度^[29]。文献计量学中常用聚类分析来获取某研究领域的相关性, 通过对该领域的文献关键词进行归类分析来明确研究的方向^[31]。本研究运用 SPSS 软件中的聚类分析方法对国内外文献高频关键词构造的矩阵进行聚类分析, 导出的聚类树状图如图 4 和图 5 所示, 高频关键词聚类划分如表 4 和表 5 所示。

从表 4 可以看出, 国外冻土微生物研究关键词聚类的群集 1 包含的高频关键词最多、涵盖面最广, 主要为冻土微生物研究领域的基础理论和实验案例, 包括特定的研究区域和气候变暖条件下土壤微生物多样性的研究。Tripathi 等^[32]研究表明, 活动层与永冻层的微生物群落多样性之间存在显著差异, 并且具有随土壤深度的增加而减少的趋势; 气候变暖造成的多年冻土解冻会引起土壤微生物功能基因多样性和碳降解基因的相对丰度增加, 从而影响碳库的稳定性和碳循环过程^[4]。同时, 群集 1 还

包含了宏基因组学(metagenomics)和 16S rRNA 基因的微生物多样性研究手段以及南极洲(Antarctica)、北方森林(boreal forest)和青藏高原(Tibetan Plateau)等的冻土微生物的次要研究区域。此外, 在群集 1 内国外还涉及天体生物学的研究, 研究的案例都是基于外星球与地球陆地条件相似的原理来探究是否存在生命或宜居, 并且研究认为火星可能有存活的微生物^[33-35]。群集 2 主要进行了气候变化条件下冻土碳循环及温室气体排放的研究, 并且北极是国外冻土微生物的主要研究区域。群集 3 是本研究的主题词。近年来气候变暖引起了冻土的大量退化, 永冻层逐渐向活动层演变, 大量的有机质暴露在微生物的作用下促使 CH_4 和 CO_2 的排放速率增加, 导致区域生态系统的“碳汇”能力减弱, 而引起的级联反应甚至会影响局部生态环境的演变。目前温室气体排放通量的测量主要通过野外与室内模拟相结合的方法, 但回归模型和仿真技术仍存在一定的不确定性, 因此, 对多年冻土区的物理、生物过程模拟仍需进一步完善^[36]。由于极地气候对温度的变化十分敏感, 在极地开展气候、冻土微生物与碳循环关系的研究对冻土区域乃至全球气候的预测都具有重要意义。

国内冻土微生物研究关键词的聚类集体划分如表 5 所示, 群集 1 的研究主要为我国早期冻土微生物的筛选、培养以及在石油降解方面的应用, 另外还包括冻土融化等外界环境变化对土壤微生物群落造成的影响。群集 2 是国内冻土微生物研究的主题词。群集 3 主要探究青藏高原冻土带微生物群落对外界条件改变的响应; 此外, 青藏高原是中低纬度多年冻土分布最广的地区, 而其远超平均增温速率的特性也将引起国家和科研人员的高度重视。

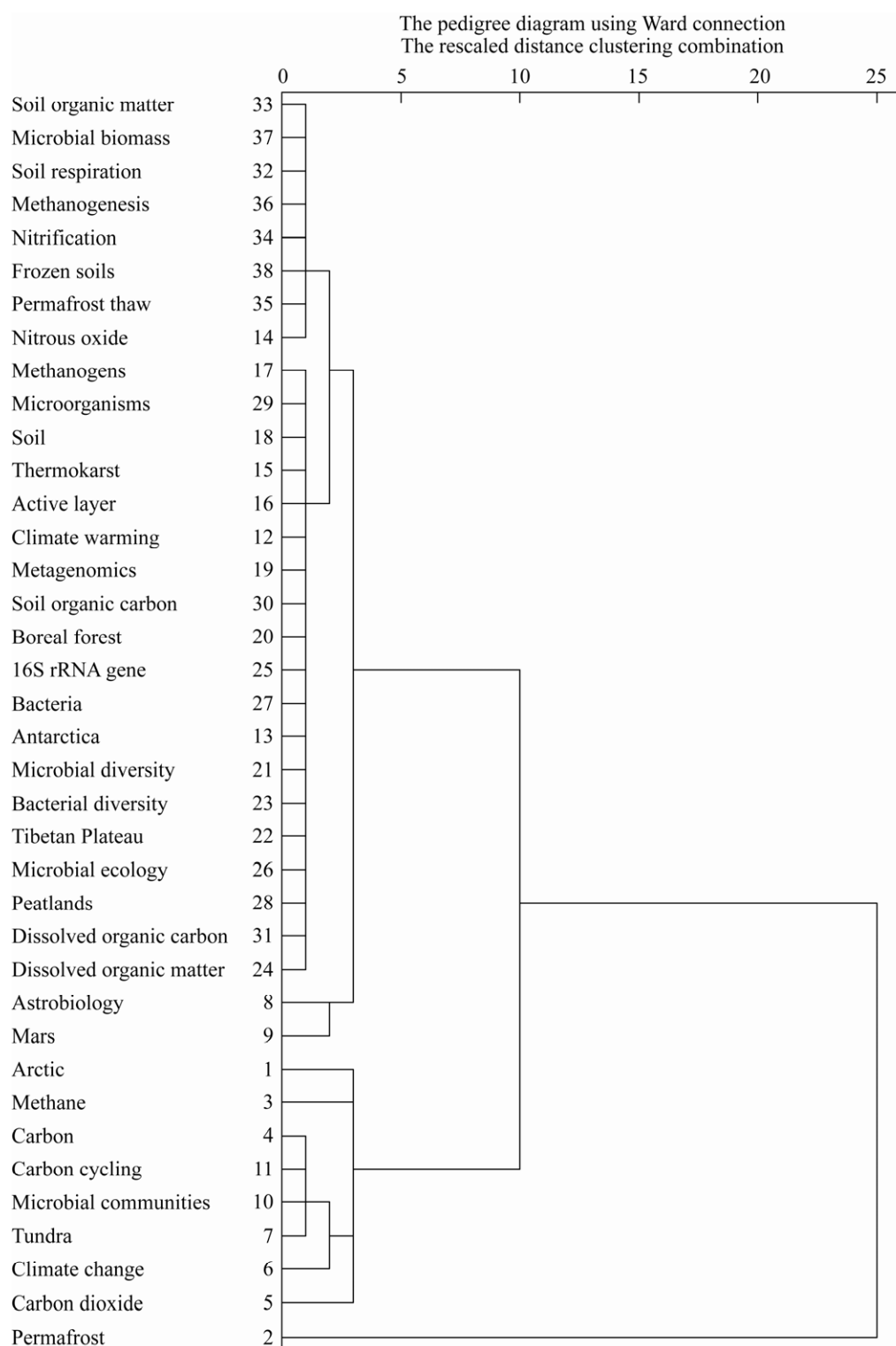


图 4 国外冻土微生物研究高频关键词系统聚类分析树状图

Figure 4 High-frequency keywords system cluster analysis dendrogram of permafrost microorganisms research abroad.

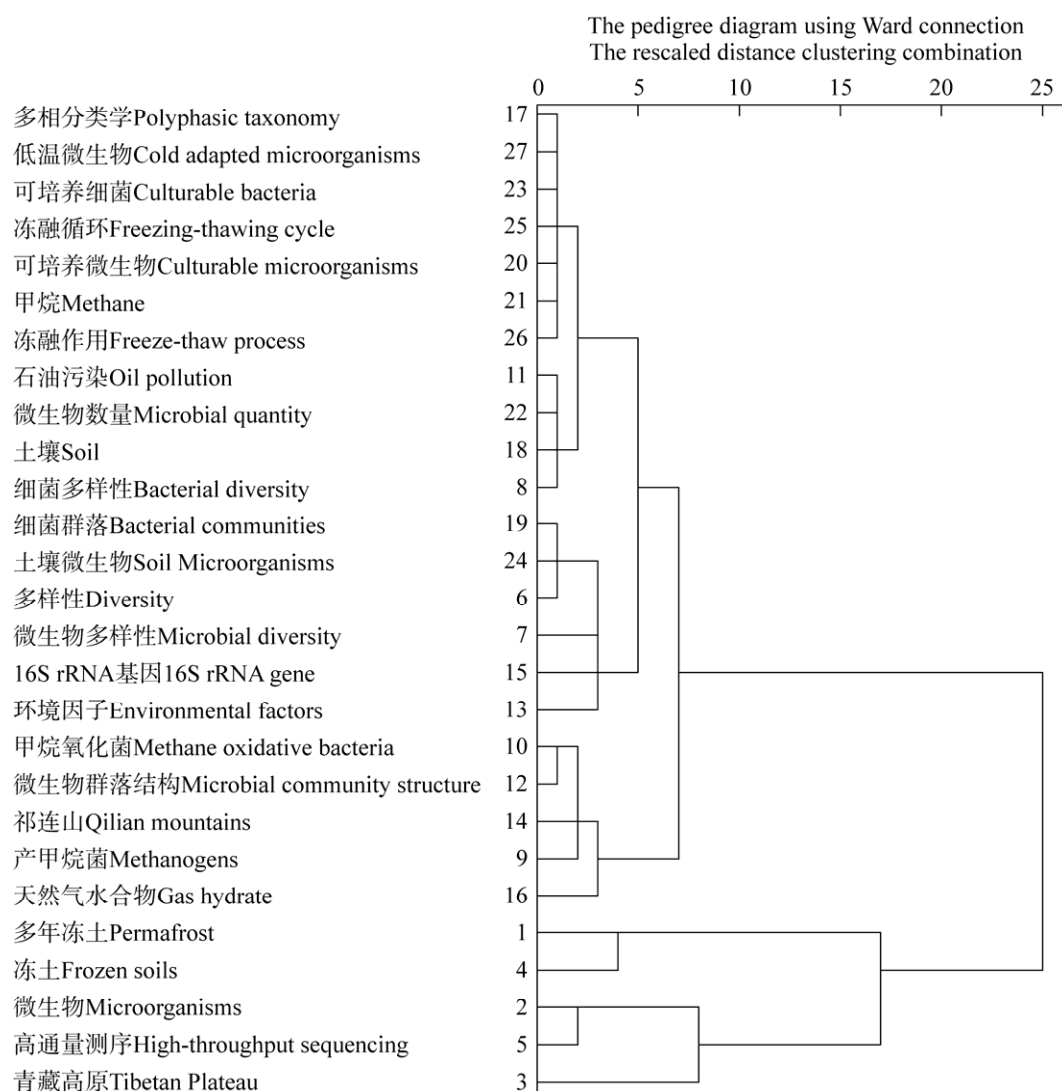


图 5 国内冻土微生物研究高频关键词系统聚类分析树状图

Figure 5 High-frequency keywords system cluster analysis dendrogram of permafrost microorganisms research in domestic.

表 4 国外冻土微生物研究关键词聚类群集划分

Table 4 Classification of keyword clusters in permafrost microorganisms research abroad

集群 Clusters	关键词 Keywords
群集 1 Cluster 1	Soil organic matter, Microbial biomass, Soil respiration, Methanogenesis, Nitrification, Frozen soils, Permafrost thaw, Nitrous oxide, Methanogens, Microorganisms, Soil, Thermokarst, Active layer, Climate warming, Metagenomics, Soil organic carbon, Boreal frost, 16S rRNA gene, Bacteria, Antarctica, Microbial diversity, Bacterial diversity, Tibetan Plateau, Microbial ecology, Peatlands, Dissolved organic carbon, Dissolved organic matter, Astrobiology, Mars
群集 2 Cluster 2	Arctic, Methane, Carbon, Carbon cycling, Microbial communities, Tundra, Climate change, Carbon dioxide
群集 3 Cluster 3	Permafrost

表 5 国内冻土微生物研究关键词聚类群集划分

Table 5 Classification of keyword clusters in permafrost microorganisms research in domestic

集群 Clusters	关键词 Keywords
群集 1 Cluster 1	多相分类学、低温微生物、可培养细菌、冻融循环、可培养微生物、甲烷、冻融作用、石油污染、微生物数量、土壤、细菌多样性、细菌群落、土壤微生物、多样性、微生物多样性、16S rRNA 基因、环境因子、甲烷氧化菌、微生物群落结构、祁连山、产甲烷菌、天然气水合物 Polyphasic taxonomy, Cold adapted microorganisms, Culturable bacteria, Freezing-thawing cycle, Culturable microorganisms, Methane, Freeze-thaw process, Oil pollution, Microbial quantity, Soil, Bacterial diversity, Bacterial communities, Soil Microorganisms, Diversity, Microbial diversity, 16S rRNA gene, Environmental factors, Methane oxidative bacteria, Microbial community structure, Qilian mountains, Methanogens, Gas hydrate
群集 2 Cluster 2	冻土、多年冻土 Frozen soils, Permafrost
群集 3 Cluster 3	微生物、高通量测序、青藏高原 Microorganisms, High-throughput sequencing, Tibetan Plateau

3 讨论与结论

本研究基于文献计量学的方法对国内外冻土微生物领域的文献进行了分析,得出以下结论:

(1) 当前冻土微生物的研究主要集中在国外,以时间顺序和发文数量来看,该领域研究在国内仍处于初始阶段。

(2) 国外不同研究阶段的热点存在异同,但其总体上主要向微生物与碳循环之间的联系发展,强调气候变暖带来的微生物群落结构变化与冻土有机碳的转换之间的作用关系;而国内研究主要与冻土环境下微生物多样性变化及温室气体排放有关。

(3) 聚类分析发现,国内外在冻土微生物的研究方向存在差异。国外主要以冻土退化为基础,将微生物和有机碳作为研究对象,探讨微生物对有机碳的降解作用带来的温室气体排放对冻土区乃至全球的影响;此外,国外还比较重视以冻土微生物为研究对象来探究地球外宜居星球的天体生物学研究。国内研究重点主要为冻土区微生物分布与结构多样性的研究和甲烷排放以及微生物在土壤、石油污染降解方面的应用。

从本研究的表 1-3 中的高频关键词可以看出,国内外冻土微生物的研究在菌群分类上主要为细菌,其次是古菌,而缺乏对真菌的研究可能是因为细菌能代谢冻土中稀缺的营养物质,而真菌多以孢子或其他结构的形式长期休眠在永久冻土中,活性较低^[37]。目前有关冻土真菌对升温的响应还存在不一致的结果,如 Feng 等^[38]研究表明增温只改变了细菌群落组成,但真菌并无明显的变化;而 Chen 等^[4]基于大规模样点分析结果表明,多年冻土融化后真菌多样性降低,但功能基因多样性相对丰度却增加。在陆地生态系统中,真菌主要充当分解者的角色,同时还可以与植物形成共生网络,具有调节凋落物和土壤有机质分解及植物生长的重要生态功能。例如, Tan 等^[39]研究发现丛枝菌根真菌(arbuscular mycorrhizal fungi)显著提高了土壤有机碳、全氮和磷的有效性,加速了有机质的降解,有助于提高土壤有机碳和养分含量;而 Brzostek 等^[40]却研究发现 AM 真菌丰度的减少反而能促进凋落叶的分解;不同的结果可能与土壤理化、植被类型或气候有关^[41]。尽管目前已经开展了相关真菌对气候变暖响应的研究,但仍缺乏对冻土区真菌受多种

环境因子影响的综合反映。

就冻土区域而言, 地表温度升高和永久冻土隔水能力下降引起的土壤表层含水量和地下水位降低等的水热条件变化会对寒区植被造成不可逆转的演替^[42]。研究发现, 冻土区气候暖干化趋势加剧会导致植被类型由耐寒、喜湿转变为中生或旱生^[43-44], 最终可能演替成稀疏草原甚至沙化, 严重威胁生态环境的稳态。而越来越多的证据表明, 土壤微生物与植物群落组成密切相关, 微生物在调节植物适应、共存、相对丰度、演替甚至是植物入侵方面均发挥着重要作用^[45]。例如: Grayston 等^[46]认为, 微生物的群落代谢差异主要与植物种类有关; 逢好胜等^[47]对大兴安岭的研究发现, 森林植被退化导致微生物群落功能多样性减少, 碳代谢的功能多样性下降。因此在冻土区, 尤其是北方森林、高寒草甸等地发生的植被类型演替与微生物互作效应的研究对陆地生态系统影响重大, 而本研究的结果却发现冻土微生物与植被生态系统的研究十分缺乏。鉴于全球变暖的加剧, 提高植被与微生物之间联系的研究已不容忽视。

综上所述, 尽管目前有关冻土微生物的研究已取得许多成果, 但在研究内容和方向上依旧存在一定的趋势性, 缺乏对某些非热点领域的研究。提高对冻土区真菌以及植被、微生物与土壤三者互作关系的研究有利于进一步推动该领域的发展, 进而有利于从大环境的角度看气候变化对冻土微生物的全面性影响。本研究在文献检索和分析的过程中存在不足, 检索出的国外文献主要采用手动筛选, 可能存在缺漏或选错的情况, 而对于国内文献仅针对期刊和学位论文且手动筛选存在误差, 这些都可能对此研究结果有所影响。

4 展望

以上主要基于文献计量的方法论述了冻土微生物的研究现状和热点问题, 可以看出, 国内外在该领域的研究已经取得了丰硕的成果, 认识逐渐加深。尽管国内外研究方向、研究热点和研究力度存在差异, 但仍能为后续的研究提供方向、理论和数据的支持。为此, 我们有以下几个方面的建议:

(1) 文献阅读和科研方向的参考。本研究得出的结论可为初次接触该领域的科研者提供文献查找和阅读的入门指导, 给综述性写作及学位开题内容提供研究热点和国内外现状的参考依据, 有效提高了科研人员查阅文献的效率; 在科研过程中, 计量分析中的高频关键词和网络可视化图能为课题组提供更全面的知识网络体系和科研指标, 科研者能掌握近年的研究热点和趋势。

(2) 加强国内外研究合作, 多方位促进冻土微生物研究领域的发展。国内外冻土微生物领域研究热点和内容存在异同, 在科研前沿性、平均发文数量和水平上国外要优于国内, 因此, 在研究过程中国内要吸取国外研究的优秀成果, 扩展国内研究方向。在统筹国内外研究的基础上, 采用多学科交叉、多模型有机耦合、多尺度与多途径的研究方法促进冻土微生物研究在微观和宏观角度的综合性发展。加强国内外研究成果交流, 共同搭建全球冻土微生物研究的平台。

(3) 文献计量分析软件开发的集成化和标准化。文献计量作为一种文献分析方法, 现已应用于多种学科领域, 为科研学者带来了诸多便利。虽然相关的分析软件都具有自己独特的功能, 但计量结果的分析方法和过程会因选用不同的软件产生差异, 如网络视图、聚类图等。

因此,一体化、集成化和标准化软件的开发对文献计量领域具有重要意义。

REFERENCES

- [1] 赵全宁, 严应存, 刘彩虹, 祁栋林, 铁吉新. 1980–2017 年青海省玉树地区季节冻土变化对气候变暖的响应[J]. 冰川冻土, 2018, 40(5): 899-906
- Zhao QN, Yan YC, Liu CH, Qi DL, Tie JX. The response of seasonally frozen soil depth to climate warming in Yushu prefecture, Qinghai province from 1980 to 2017[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2018, 40(5): 899-906 (in Chinese)
- [2] Anisimov O, Reneva S. Permafrost and changing climate: the Russian perspective[J]. AMBIO: a Journal of the Human Environment, 2006, 35(4): 169-175
- [3] Hugelius G, Strauss J, Zubrzycki S, Harden JW, Schuur EAG, Ping CL, Schirrmeister L, Grosse G, Michaelson GJ, Koven CD, et al. Estimated stocks of circumpolar permafrost carbon with quantified uncertainty ranges and identified data gaps[J]. Biogeosciences, 2014, 11(23): 6573-6593
- [4] Chen YL, Liu FT, Kang LY, Zhang DY, Kou D, Mao C, Qin SQ, Zhang QW, Yang YH. Large-scale evidence for microbial response and associated carbon release after permafrost thaw[J]. Global Change Biology, 2021, 27(14): 3218-3229
- [5] Peñuelas J, Sardans J, Estiarte M, Ogaya R, Carnicer J, Coll M, Barbeta A, Rivas-Ubach A, Llusà J, Garbulsy M, et al. Evidence of current impact of climate change on life: a walk from genes to the biosphere[J]. Global Change Biology, 2013, 19(8): 2303-2338
- [6] Jorgenson MT, Osterkamp TE. Response of boreal ecosystems to varying modes of permafrost degradation[J]. Canadian Journal of Forest Research, 2005, 35(9): 2100-2111
- [7] Jorgenson MT, Shur YL, Pullman ER. Abrupt increase in permafrost degradation in Arctic Alaska[J]. Geophysical Research Letters, 2006, 33(2): L02503
- [8] 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-Science Reviews, 2010, 103(1/2): 31-44
- [9] 马俊杰, 李韧, 刘宏超, 吴通华, 肖瑶, 杜宜臻, 杨淑华, 史健宗, 乔永平. 青藏高原多年冻土区活动层水热特性研究进展[J]. 冰川冻土, 2020, 42(1): 195-204
- Ma JJ, Li R, Liu HC, Wu TH, Xiao Y, Du YZ, Yang SH, Shi JZ, Qiao YP. A review on the development of study on hydrothermal characteristics of active layer in permafrost areas in Qinghai-Tibet Plateau[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2020, 42(1): 195-204 (in Chinese)
- [10] Liu FT, Kou D, Chen YL, Xue K, Ernakovich JG, Chen LY, Yang GB, Yang YH. Altered microbial structure and function after thermokarst formation[J]. Global Change Biology, 2021, 27(4): 823-835
- [11] Müller O, Bang-Andreasen T, White RA 3rd, Elberling B, Taş N, Kneafsey T, Jansson JK, Øvreås L. Disentangling the complexity of permafrost soil by using high resolution profiling of microbial community composition, key functions and respiration rates[J]. Environmental Microbiology, 2018, 20(12): 4328-4342
- [12] Deng J, Gu YF, Zhang J, Xue K, Qin YJ, Yuan MT, Yin HQ, He ZL, Wu LY, Schuur EAG, et al. Shifts of tundra bacterial and archaeal communities along a permafrost thaw gradient in Alaska[J]. Molecular Ecology, 2015, 24(1): 222-234
- [13] Chu HY, Fierer N, Lauber CL, Caporaso JG, Knight R, Grogan P. Soil bacterial diversity in the Arctic is not fundamentally different from that found in other biomes[J]. Environmental Microbiology, 2010, 12(11): 2998-3006
- [14] Schuur EAG, Mack MC. Ecological response to permafrost thaw and consequences for local and global ecosystem services[J]. Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics, 2018, 49: 279-301
- [15] Schuur EAG, Bockheim J, Canadell JG, Euskirchen E, Field CB, Goryachkin SV, Hagemann S, Kuhry P, Lafleur PM, Lee HN, et al. Vulnerability of permafrost carbon to climate change: implications for the global carbon cycle[J]. BioScience, 2008, 58(8): 701-714
- [16] 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
- Ye SX, Xu WM. On the application advances of bibliometrics for the evaluation of scientific research[J]. Library Tribune, 2003, 23(4): 12-14 (in Chinese)
- [17] 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
- Liu CX, Fang BJ. Bibliometrics analysis on research of tuberculosis in China from 2011 to 2020[J]. Modern Preventive Medicine, 2021, 48(14): 2520-2523, 2551 (in Chinese)
- [18] 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
- Gao MF, Qiu JJ, Liu SC, Liu HB, Wang LG, Pang HC. Status and trends of agricultural diffuse pollution research based on bibliometrics[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2014, 47(6): 1140-1150 (in Chinese)
- [19] 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
- Sheng CL, Lu XG, Yin XM, Yan CP. Bibliometrical analysis of wetland research based on web of science from 1899 to 2010[J]. *Wetland Science*, 2012, 10(1): 92-101 (in Chinese)
- [20] 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
- Feng Y, Zheng JW. An analysis of status and trends of the international remote sensing science on bibliometrics[J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2005, 20(5): 526-530 (in Chinese)
- [21] 全婧婧, 郭荣欣, 邹德勋, 郑旭升, 刘研萍. 土壤污染微生物修复领域文献计量分析[J]. 土壤通报, 2021, 52(3): 736-746
- Tong JJ, Guo RX, Zou DX, Zheng XS, Liu YP. Bibliometric analysis on the research of microbial remediation of soil pollution[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2021, 52(3): 736-746 (in Chinese)
- [22] 李雅, 刘梅, 曾全超, 顾丹丹, 刘少敏, 安韶山. 基于文献计量的土壤有机碳与土壤微生物多样性研究前沿态势分析[J]. 土壤通报, 2017, 48(3): 745-756
- Li Y, Liu M, Zeng QC, Gu DD, Liu SM, An SS. Frontier situation analysis of the research on soil carbon sequestration and soil microbial diversity based on bibliometric[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2017, 48(3): 745-756 (in Chinese)
- [23] 王敏, 张志强. 知识发现研究文献定量分析[J]. 图书情报工作, 2008(4): 29-31
- Wang M, Zhang ZQ. A quantitative analysis of knowledge discovery papers[J]. *Library and Information Service*, 2008(4): 29-31 (in Chinese)
- [24] 沈永平. IPCC WGI 第四次评估报告关于全球气候变化的科学要点[J]. 冰川冻土, 2007, 29(1): 156
- Shen YP. Key results from summary for policymakers of IPCC WGI AR4[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2007, 29(1): 156 (in Chinese)
- [25] 沈永平, 王国亚. IPCC 第一工作组第五次评估报告对全球气候变化认知的最新科学要点[J]. 冰川冻土, 2013, 35(5): 1068-1076
- Shen YP, Wang GY. Key findings and assessment results of IPCC WGI fifth assessment report[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2013, 35(5): 1068-1076 (in Chinese)
- [26] 张玲玲, 巩杰, 张影. 基于文献计量分析的生态系统服务研究现状及热点[J]. 生态学报, 2016, 36(18): 5967-5977
- Zhang LL, Gong J, Zhang Y. A review of ecosystem services: a bibliometric analysis based on web of science[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 36(18): 5967-5977 (in Chinese)
- [27] 王耕, 常畅, 于小茜, 徐惠民. 基于文献计量分析的珊瑚礁研究现状与热点[J]. 生态学报, 2019, 39(3): 1114-1123
- Wang G, Chang C, Yu XX, Xu HM. Status quo and hotspots of coral reef research based on bibliometric analysis[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39(3): 1114-1123 (in Chinese)
- [28] 李继光, 孙慧, 朱帅, 罗碧霞, 周煜, 朱鹏, 许尤厚, 刘思杰. 基于文献计量的海洋牧场研究发展态势[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(6): 2232-2241
- Li JG, Sun H, Zhu S, Luo BX, Zhou Y, Zhu P, Xu YH, Liu SJ. Development trend of marine ranching research based on bibliometrics[J]. *Science Technology and Engineering*, 2021, 21(6): 2232-2241 (in Chinese)
- [29] 李秋云, 韩国圣, 张爱平, 徐虹. 1979–2012 年中国旅游地理学文献计量与内容分析[J]. 旅游学刊, 2014, 29(9): 110-119
- Li QY, Han GS, Zhang AP, Xu H. Bibliometric and content analysis of China's tourism geography research from 1979 to 2012[J]. *Tourism Tribune*, 2014, 29(9): 110-119 (in Chinese)
- [30] 廖胜蛟, 肖仙桃. 基于文献计量的共词分析研究进展[J]. 情报科学, 2008, 26(6): 855-859
- Liao SJ, Xiao XT. Research advances on the bibliometrics-based co-word analysis[J]. *Information Science*, 2008, 26(6): 855-859 (in Chinese)
- [31] 韦想云, 朱国平. 基于文献计量分析的南极海洋保护区研究动态[J]. 极地研究, 2021, 33(1): 88-98
- Wei XY, Zhu GP. Bibliometric analysis of Antarctic marine protected area research[J]. *Chinese Journal of Polar Research*, 2021, 33(1): 88-98 (in Chinese)
- [32] Tripathi BM, Kim M, Kim Y, et al. Variations in bacterial and archaeal communities along depth profiles of Alaskan soil cores[J]. *Scientific reports*, 2018, 8(1): 504
- [33] Cheptsov VS, Vorobyova EA, Manucharova NA, Gorlenko MV, Pavlov AK, Vdovina MA, Lomasov VN, Bulat SA. 100 kGy gamma-affected microbial

- communities within the ancient Arctic permafrost under simulated Martian conditions[J]. *Extremophiles: Life Under Extreme Conditions*, 2017, 21(6): 1057-1067
- [34] Gilichinsky M, Demidov N, Rivkina E. Morphometry of volcanic cones on Mars in perspective of Astrobiological research[J]. *International Journal of Astrobiology*, 2015, 14(4): 537-545
- [35] Wilhelm RC, Radtke KJ, Mykityczuk NCS, Greer CW, Whyte LG. Life at the wedge: the activity and diversity of Arctic ice wedge microbial communities[J]. *Astrobiology*, 2012, 12(4): 347-360
- [36] 倪杰, 吴通华, 赵林, 李韧, 谢昌卫, 吴晓东, 朱小凡, 杜宜臻, 杨成, 郝君明. 环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
- Ni J, Wu TH, Zhao L, Li R, Xie CW, Wu XD, Zhu XF, Du YZ, Yang C, Hao JM. Carbon cycle in circum-Arctic permafrost regions: progress and prospects[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2019, 41(4): 845-857 (in Chinese)
- [37] Bakermans C, Tsapin AI, Souza-Egipsy V, Gilichinsky DA, Nealson KH. Reproduction and metabolism at -10 degrees C of bacteria isolated from Siberian permafrost[J]. *Environmental Microbiology*, 2003, 5(4): 321-326
- [38] Feng JJ, Wang C, Lei JS, Yang YF, Yan QY, Zhou XS, Tao XY, Ning DL, Yuan MM, Qin YJ, et al. Warming-induced permafrost thaw exacerbates tundra soil carbon decomposition mediated by microbial community[J]. *Microbiome*, 2020, 8(1): 3
- [39] Tan QY, Si JP, He YJ, Yang Y, Shen KP, Xia TT, Kang LL, Fang ZY, Wu BL, Guo Y, et al. Improvement of Karst soil nutrients by arbuscular mycorrhizal fungi through promoting nutrient release from the litter[J]. *International Journal of Phytoremediation*, 2021, 23(12): 1244-1254
- [40] Brzostek ER, Dragoni D, Brown ZA, Phillips RP. Mycorrhizal type determines the magnitude and direction of root-induced changes in decomposition in a temperate forest[J]. *The New Phytologist*, 2015, 206(4): 1274-1282
- [41] 张春楠, 张瑞芳, 王红, 等. 丛枝菌根真菌影响作物非生物胁迫耐受性的研究进展[J]. *微生物学通报*, 2020, 47(11): 3880-3891
- Zhang CN, Zhang RF, Wang H. Effects of arbuscular mycorrhizal fungi on abiotic stress tolerance in crops: a review[J]. *Microbiology China*, 2020, 47(11): 3880-3891 (in Chinese)
- [42] 冯雨晴, 梁四海, 吴青柏, 陈建伟, 田鑫, 吴盼. 冻土退化过程中植被覆盖度的变化研究[J]. *北京师范大学学报(自然科学版)*, 2016, 52(3): 311-316
- Feng YQ, Liang SH, Wu QB, Chen JW, Tian X, Wu P. Vegetation responses to permafrost degradation in the Qinghai-Tibetan Plateau[J]. *Journal of Beijing Normal University: Natural Science*, 2016, 52(3): 311-316 (in Chinese)
- [43] 郭金停, 韩凤林, 胡远满, 聂志文, 任百慧, 布仁仓. 大兴安岭北坡多年冻土区植物生态特征及其对冻土退化的响应[J]. *生态学报*, 2017, 37(19): 6552-6561
- Guo JT, Han FL, Hu YM, Nie ZW, Ren BH, Bu RC. Ecological characteristics of vegetation and their responses to permafrost degradation in the north slope of Great Khingan Mountain valley of northeast China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, 37(19): 6552-6561 (in Chinese)
- [44] 孙菊, 李秀珍, 胡远满, 王宪伟, 吕久俊, 李宗梅, 陈宏伟. 大兴安岭沟谷冻土湿地植物群落分类、物种多样性和物种分布梯度[J]. *应用生态学报*, 2009, 20(9): 2049-2056
- Sun J, Li XZ, Hu YM, Wang XW, Lyu JJ, Li ZM, Chen HW. Classification, species diversity, and species distribution gradient of permafrost wetland plant communities in Great Xing'an Mountains valleys of Northeast China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2009, 20(9): 2049-2056 (in Chinese)
- [45] Schütte UME, Henning JA, Ye YZ, Bowling A, Ford J, Genet H, Waldrop MP, Turetsky MR, White JR, Bever JD. Effect of permafrost thaw on plant and soil fungal community in a boreal forest: does fungal community change mediate plant productivity response?[J]. *Journal of Ecology*, 2019, 107(4): 1737-1752
- [46] Grayston SJ, Wang S, Campbell CD, Edwards AC. Selective influence of plant species on microbial diversity in the rhizosphere[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1998, 30(3): 369-378
- [47] 逢好胜, 张会慧, 李鑫, 丁伟鹏, 胡举伟, 林晗婧, 敖红, 孙广玉. 大兴安岭林区森林退化对土壤微生物群落功能的影响[J]. *森林工程*, 2015, 31(3): 25-30
- Pang HS, Zhang HH, Li X, Ding WP, Hu JW, Lin HJ, Ao H, Sun GY. Effects of forest degradation on soil microbial communities in Daxing'an mountains[J]. *Forest Engineering*, 2015, 31(3): 25-30 (in Chinese)