

<https://doi.org/10.3799/dqkx.2022.083>



全球和我国多年冻土分布范围和实际面积研究进展

刘桂民^{1,2}, 张博¹, 王莉¹, 吴晓东²

1. 兰州交通大学环境与市政工程学院, 甘肃兰州 730070

2. 中国科学院西北生态环境资源研究院冰冻圈科学国家重点实验室, 青藏高原冰冻圈观测研究站, 甘肃兰州 730070

摘要: 全球变暖会导致多年冻土解冻融化, 这不仅对多年冻土区的工程和基础设施产生重要影响, 还会改变陆地和大气间能量、水分和碳循环而反馈于气候系统. 多年冻土主要分布于地下, 其实际分布资料很难获取, 因而许多研究对多年冻土区及其实际面积描述不清, 进而影响了多年冻土变化和碳循环等研究结果. 近年来, 随着遥感和模型的发展, 多年冻土实际分布取得了一系列的进展. 根据国内外的最新结果, 对全球和我国多年冻土区及其实际面积进行了综合分析. 结果表明, 目前北半球多年冻土区面积约为 2 100 万 km², 多年冻土实际面积约为 1 400 万 km². 我国青藏高原多年冻土区面积约为 150 万 km², 实际多年冻土约为 105 万 km², 我国其他地区的多年冻土实际分布还需进一步的研究.

关键词: 多年冻土; 多年冻土区; 气候变化; 青藏高原; 北极; 环境地质.

中图分类号: P941.5

文章编号: 1000-2383(2023)12-4689-10

收稿日期: 2022-01-15

Permafrost Region and Permafrost Area in Globe and China

Liu Guimin^{1,2}, Zhang Bo¹, Wang Li¹, Wu Xiaodong²

1. School of Environmental and Municipal Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China

2. Cryosphere Research Station on the Qinghai-Tibetan Plateau, State Key Laboratory of Cryospheric Science, Northwest Institute of the Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730070, China

Abstract: Global warming will lead to the thaw of permafrost degradation. The permafrost degradation can cause serious damage to engineering and infrastructure in permafrost regions, it can also change water, energy and carbon cycle between the land and the atmosphere and further create a feedback to climate change. Most permafrost is the ground below the earth's surface and thus is difficult to be detected. There are many literatures used the terms of permafrost region and permafrost area ambiguously, and the incorrectly use of the two terms can lead serious mistakes in permafrost change and carbon budget calculation. Recently, there are many advances in remote sensing and modelling of permafrost. Here it systematically reviews the literatures to clarify the area of permafrost regions and the actual permafrost area in the world as well as in China. The most recent studies show that the permafrost region in the northern hemisphere is about 21×10^6 km², and the actual permafrost area is about 14×10^6 km². For the Qinghai-Tibetan plateau in China, the permafrost region occupies an area of about 1.50×10^6 km², and the actual permafrost area is about 1.06×10^6 km². More data are required to quantify the actual permafrost area in other permafrost regions in China.

Key words: permafrost; permafrost region; climate change; Qinghai-Tibetan plateau; Arctic; environmental geology.

基金项目: 国家自然科学基金项目(Nos. 41941015, 32061143032, 41871060); 中科院西部之光项目资助(No.2020-82).

作者简介: 刘桂民(1977-), 女, 教授, 从事多年冻土与环境研究. ORCID: 0000-0002-1409-789X. E-mail: liuguimin@ljtu.edu.cn

引用格式: 刘桂民, 张博, 王莉, 吴晓东, 2023. 全球和我国多年冻土分布范围和实际面积研究进展. 地球科学, 48(12): 4689-4698.

Citation: Liu Guimin, Zhang Bo, Wang Li, Wu Xiaodong, 2023. Permafrost Region and Permafrost Area in Globe and China. *Earth Science*, 48(12): 4689-4698.

0 引言

多年冻土主要分布在高纬度和高海拔地区,通常地处偏远且气候寒冷.因此,很多人对于多年冻土的了解很少.近年来,随着气候变暖的态势日益严重,包括冰川、多年冻土、海冰等冰冻圈要素也日益为人们关注(IPCC, 2019).多年冻土的退化不仅对人类的公路、铁路等基础设施产生危害(Wu *et al.*, 2002; Niu *et al.*, 2005; Wu *et al.*, 2016a),还会影响生态系统演替,改变陆地与大气之间的能量、水分和碳循环,从而反馈于气候,因而近年来成为地球系统科学领域关注的热点科学问题(Schuur *et al.*, 2015; 马蕾和金会军, 2020; 张凤等, 2020).

自 1990 年以来,关于多年冻土的论文越来越多,国内外主要的数据库中关于多年冻土的研究论文增长了大约 10 倍(图 1).发表论文数量的快速增加表明了多年冻土的研究者越来越多,但对多年冻土变化及其气候效应等科学问题的认识还存在很大差异.例如,IPCC 第 6 次评估报告认为,到 2100 年之前,气温每升高 1 °C,多年冻土碳的释放量为 30~410 亿 t (Arias *et al.*, 2021),该观点被认为是国际学术界的主流观点.这些结果产生巨大差异(Zhuang *et al.* 2006; Koven *et al.* 2011; Schaefer *et al.* 2011; Schneider von Deimling *et al.* 2012; Burke *et al.* 2013)的原因有很多,除了实际观测资料较少、分析手段不同、模型结构迥异等因素外,许

多论文对于多年冻土范围和面积的界定不清也是重要的原因.

受到气候变暖的影响,全球范围内的多年冻土正在呈现快速退化状态(Biskaborn *et al.*, 2019).多年冻土退化会反馈于气候,因而其研究受到了气候领域科学家的重视.例如,国际耦合模式比较计划第 6 阶段耦合模式计划(CMIP6)已经考虑多年冻土的影响.同时,多年冻土变化还会影响到生态演替、水文循环等过程,其融化引起的沉降还会威胁到工程设施,并可能引发地质灾害(赵林等, 2019).因此,开展多年冻土研究的学者的专业背景复杂,包括气象和气候学、土壤学、生态学、水文学、工程学和地质学等多个领域.

早期关于多年冻土的研究学者主要来自于普通冻土学和冻土工程学领域,研究内容集中于局地尺度的多年冻土的分布、特征、变化及其影响方面,研究内容也较少涉及到多年冻土变化对区域或全球的环境效应.由于研究技术和手段的缺乏,对于多年冻土的实际面积认识也不足.近年来,随着遥感技术的发展和应用以及多年冻土模型的发展,对多年冻土实际分布面积的研究也取得了较多进展.此外,各种模型如陆面过程模型(CLM5.0, Noah-MP)、动态植被模型(LPJ-GUESS)也陆续考虑了多年冻土.因此,明确多年冻土区和多年冻土的面积已经十分重要.基于国内外的进展,本文综合归纳了多年冻土区

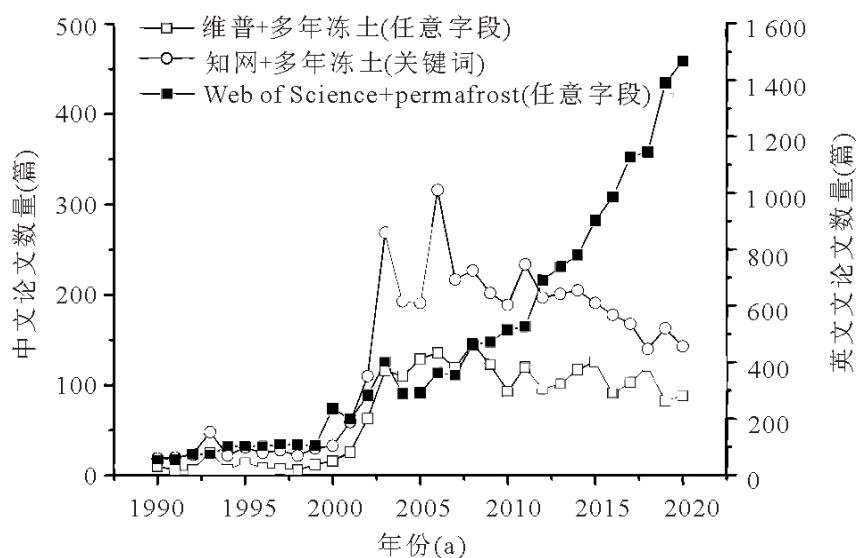


图1 1990年以来国内外数据库发表关于多年冻土的论文数量

Fig.1 The number of peer-reviewed articles published in different databases since 1990

的分布范围,给出了多年冻土区的实际面积,分析了多年冻土区和多年冻土实际面积混用带来的影响,并提出了下一步研究需要注意的问题。

1 多年冻土定义和范围

目前国际上多年冻土定义是:温度处于 0°C 或低于 0°C ,连续存在两年及以上的含有各种物质的岩石或土壤(Dobinski, 2011)。多年冻土的英文是 permafrost,是由美国科学家西蒙·穆勒(Simon William Muller)在1943年研读俄罗斯文献时,用 permanently frozen ground 创造的,原意为永久冻结的土地。因此,中文早期的对应翻译为永久冻土。实际上,早期的人们可能确实相信,这些土地是永久冻结的。但是显然,这些土地并非永久冻结,而是不断变化的。根据其定义要求的“连续两年或更久”时间段来看,“永久冻土”的翻译也不合适。此外,“永久冻土”不仅会给公众造成误解,在专业领域内,用“永久冻土发生变化”这样的语句在表达时,也存在着在逻辑上的矛盾。因此,近年来,我国冰冻圈领域的科学家已经达成共识,确定 permafrost 的唯一正确名称是多年冻土。需要强调的是,多年冻土温度要求等于或低于 0°C ,并不一定是冻结状态。土壤含水率很低的时候,冻结状态就不明显,而在土壤盐度含量很高的时候,水的凝固点小于 0°C ,处于未冻结状态,但只要其存在时间不小于两年,就属于多年冻土。

多年冻土主要分布在北半球的高纬度和高海拔地区(Obu *et al.*, 2019)。南半球的高山地区如夏威夷的莫纳克亚山、非洲的乞力马扎罗山、新西兰的南阿尔卑斯山、南美安第斯山等地区也有多年冻土。在南极洲,裸露的地表大约仅占 0.3% ,这些地方全部都有多年冻土(Liu *et al.*, 2020)。南极冰盖以下可能也有多年冻土,但由于冰盖厚度达数千米,目前研究还很困难。除了陆地之外,海底也有多年冻土。海底多年冻土仅在北冰洋的大陆架上有(Sayedi *et al.*, 2020),南极海底没有多年冻土。北冰洋海底多年冻土是在末次冰期冰盛期(大约12000年前)形成的,当时地球气候寒冷,约 24% 的陆地被冰川覆盖。由于大量的淡水以冰的形式存在于陆地上,海平面比现在低120 m左右。北冰洋沿岸带就形成了大量的多年冻土。随着冰川退缩,海平面升高,

大量多年冻土被淹没,形成海底多年冻土(Sayedi *et al.*, 2020)。实际上,由于北冰洋海岸带的侵蚀退缩,目前仍然有陆地多年冻土变成海底多年冻土。在东西伯利亚北冰洋大陆架上,观测到最大的海岸带侵蚀速率为 17 m/a (Lantuit *et al.*, 2012; Günther *et al.*, 2013; Maslakov and Kraev, 2016),这些地方也就成为了如今的海底多年冻土。同陆地多年冻土一样,海底多年冻土的厚度可达到数百米,在拉普捷夫海,海底多年冻土的分布最远可距离海岸线350 km。从形成过程和其分布在大陆架上特点来看,海底多年冻土实际上是陆地多年冻土的一部分,但除了特别说明以外,人们通常所指的陆地多年冻土面积不包括海底多年冻土。

2 北半球多年冻土的范围和面积

由于南半球的多年冻土分布范围较小,多年冻土的研究主要关注北半球地区(Obu, 2021)。北半球多年冻土分布引用最多的是Zhang *et al.* (1999)发表的资料,其原文是“北半球陆地多年冻土面积大约为 $2\,279\text{ 万 km}^2$,约占陆地面积的 23.9% ”。在2000年,Zhang *et al.* (2000)进一步解释,该资料是指北半球多年冻土区的面积之和,实际多年冻土面积在 1221 万 km^2 到 1698 万 km^2 ,占北半球地表面积的 $12.8\%\sim 17.8\%$ 。然而,大量的研究往往直接或间接引用前一文献的资料,或者简称为“北半球多年冻土约占陆地面积的 $1/4$ ”,或者进一步演变为“约占陆地面积的 25% ”。截至2021年11月26日,前一说法在Google Scholar中被引用次数为600次左右,而后者被引用次数为200次左右。

Zhang *et al.* (1999, 2000)给出两个不同的数据,主要是因为其定义不同。在 $2\,279\text{ 万 km}^2$ 的资料中,所指的面积是“多年冻土带”,或者是“多年冻土区”的所有面积之和。多年冻土区(permafrost regions)和多年冻土带(permafrost zones)的面积是一致的。例如,在某一地区,大部分区域都有多年冻土,而中间夹杂一些地方没有多年冻土,但这些地区就统一定义为多年冻土地区。因此,多年冻土带或多年冻土地区的面积大于真正发育有多年冻土的地表面积。从直观感觉上来说,位于多年冻土区而实际上没有多年冻土的面积应该不大,但事实并非如此。这一点从多年冻土带的连续性划分上也可以看

出来.按照多年冻土连续性分类,多年冻土区可以分为连续多年冻土区(区域内90%以上的地方都有多年冻土)、不连续多年冻土区(多年冻土实际面积占区域总面积的50%~90%)、岛状多年冻土区(多年冻土占区域总面积小于50%)和零星多年冻土区(局部零星有多年冻土发育).当然,对于这些区域的划分主要是通过气温指数,利用冻土模型计算得到的,认为这些区域有很大可能存在多年冻土,就会将其划为多年冻土区(图2)(赵林和盛煜,2015).从多年冻土连续性的划分来看,是有明确的百分比的定量标准,但在实际情况中,这种标准的判断也十分困难,因为究竟按多大范围来计算多年冻土的实际占比并不容易确定.

多年冻土的实际分布面积是普通多年冻土学领域关注的问题.我国一些学者在局地尺度研究多年冻土的分布(罗栋梁等,2012;彭晨阳等,2021),就是为了明确实际的多年冻土分布情况和规律.除了Zhang *et al.*(2000)的文献中进行对多年冻土实际面积进行解释和评估以外,其他多位学者也对北半球陆地多年冻土的实际分布面积进行了估算.例如,在2012年,有学者利用多年冻土带指数估算北半球多年冻土的实际面积在(1 290~1 770)万 km²(Gruber,

2012);2018年有研究者通过统计模型,估计北半球多年冻土面积为(1 510±280)万 km²(Aalto *et al.*, 2018).最新的研究利用气温指数,结合多年冻土带的分布情况,计算北半球陆地多年冻土面积为1 400万 km²(Obu *et al.*, 2019),该结果也在前3个报道的范围之内(Zhang *et al.*, 2000; Gruber, 2012; Aalto *et al.*, 2018).

相对于陆地上的多年冻土,海底多年冻土的面积实际观测资料较少.根据北极大陆架的范围和一些钻探的数据,估计末次冰期冰盛期以来,海岸线的变化大约淹没了350万 km²的多年冻土区.多年冻土一旦被海水淹没后,其表层环境由早期的零下十几度的气温变成年均温接近0℃时水体温度.海底多年冻土的上覆水温度只是略微低于0℃,这些海水的温度和盐度还容易受到来自陆地河流输入的淡水的影响(Frederick and Buffett, 2015).较高的海水温度造成了海底多年冻土的快速退化.如陆地多年冻土一样,海底多年冻土的退化也表现为温度上升、地下冰融化、热喀斯特地貌形成等,并进而导致海底多年冻土的消失(Frederick and Buffett, 2014).近期估算海底多年冻土的实际面积约有200万 km²(Sayedi *et al.*, 2020).

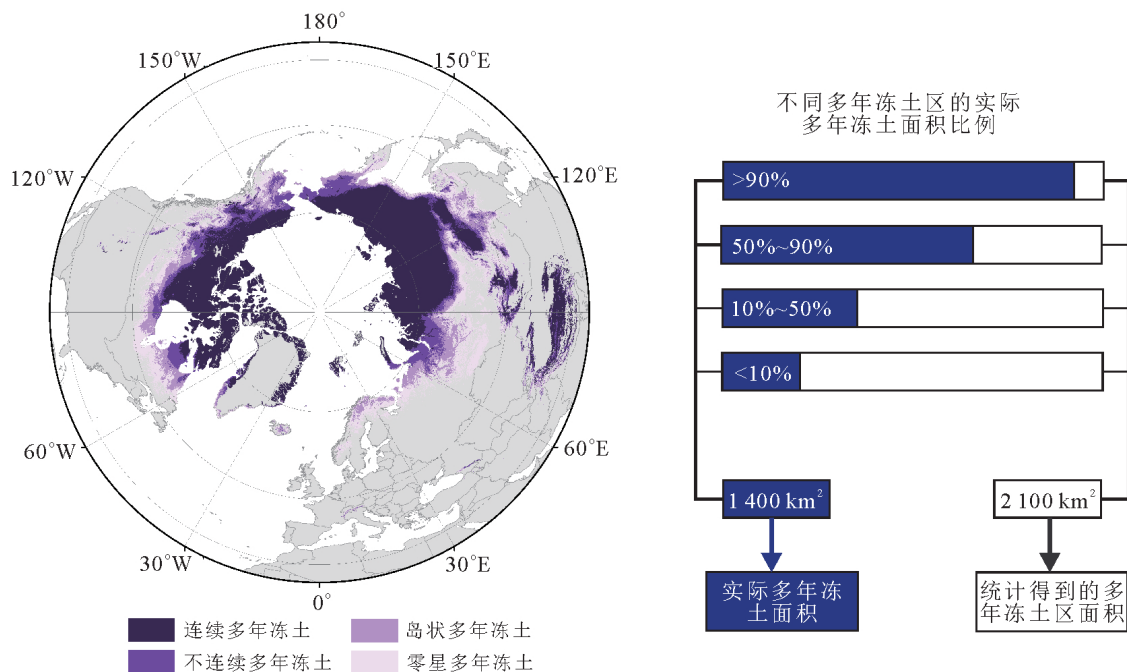


图2 北半球多年冻土区分布和实际面积比例(资源来自Obu *et al.*, 2019)

Fig.2 Permafrost region distribution and actual permafrost area in the northern hemisphere (data were from Obu *et al.*, 2019)

可见,当前北半球多年冻土区的面积约为 2 300 万 km²,其占北半球的陆地面积的 22% 或接近 1/4。但是,北半球实际多年冻土的面积却小于该面积,在没有更多实测资料(如钻探、地温测量等数据)的情况下,认为当前北半球多年冻土实际面积为 1 400 万 km²是比较稳妥的估算。同时,北冰洋的海底多年冻土面积约为 200 万 km²,这一点在相关研究中也需表述清楚,因为海底多年冻土发育在大陆架上,因而有学者将其定义为陆地冰冻圈或陆地多年冻土。

3 我国多年冻土的分布和面积

我国是世界上第三多年冻土大国,仅次于俄罗斯和加拿大(周幼吾,2000)。我国多年冻土的研究论文主要是 20 世纪 90 年代初逐渐开始发表的。通过早期的水文地质和工程地质工作,20 世纪 90 年代初期我国冻土学者认为我国多年冻土面积为 215 万 km²,占国土面积的 22.3%,其中高海拔多年冻土分布在青藏高原、天山、阿尔泰山和祁连山地区,面积为 172 万 km²,其余为高纬度多年冻土,主要分布在东北地区(程国栋,1994;周幼吾,2000)。当时报道的数据是多年冻土面积,但受当时调查和绘图等手段的限制,无法区分多年冻土区内的融区,因此实际上是指我国多年冻土带的面积。

我国东北地区多年冻土的范围和实际面积的估算结果差异很大,甚至同一研究者采用不同方法得到的结果差异都很大(表 1)。这些研究都是指多年冻土的实际分布面积,其中有报道明确指出,位于多年冻土南界(最南部的纬度线)以北的土地面积在(74~98)万 km²(Zhang *et al.*, 2019)。显然,这部分面积是我国东北多年冻土带的面积。

我国青藏高原是世界上最大的中低纬度多年冻土分布区。青藏高原是印度洋板块和亚洲板块碰撞隆起的,地质构造活动强烈(黄丰等,2020;李星波等,2021)。青藏高原平均海拔超过了 4 000 m,因而发育有大量的多年冻土。青藏高原多年冻土对区域水分和能量循环、生态环境保护、畜牧业发展、重大工程建设和碳循环方面都有重要的意义,其研究受到了广泛的关注(赵林等,2019)。近年来关于青藏高原多年冻土的研究论文数量快速增加,然而,其中关于多年冻土的分布和面积的数据同样存在着含混不清的问题。

早期青藏高原多年冻土分布是科学家在地图上手动划分的,显然是指多年冻土带的面积。在 20 世纪 90 年代到 21 世纪初,青藏高原多年冻土的面积一般被认为是 150 万 km²左右(Zhao *et al.*, 2000)。总体来看,从事多年冻土研究的学者们也很清楚该面积并非多年冻土的实际面积,在青藏高原多年冻土变化的研究中,很多都是采用实测资料,进行局部地区的多年冻土变化的研究。在 2012 年,利用青藏高原不同时期的多年冻土调查图集,认为高原实际多年冻土面积为 135 万 km²(Ran *et al.*, 2012)。2017 年,利用大量的野外调查、土壤钻孔温度资料,并根据遥感资料和多年冻土的温度计算模型,认为青藏高原多年冻土实际面积在 106 万 km²,在 90% 的置信区间范围的面积是(97~115)万 km²(Zou *et al.*, 2017)。综合多年冻土指数进行计算,认为当前高原的实际多年冻土面积为 117 万 km²,90% 的置信区间为(95~135)万 km²(Cao *et al.*, 2019)。利用机器学习法,认为高原多年冻土实际面积为 104 万 km²,90% 的置信区间为(80~128)万 km²(Ni *et al.*, 2021)。这些结果已经非常接近,即当前青藏高

表 1 我国东北多年冻土分布的研究结果

Table 1 Research results on the distribution of permafrost in Northeast China

冻土分布年代(a)	面积(万 km ²)	方法和资料	文献
1970	26~27	冻土分布南界调查,考虑冻土连续性	Jin <i>et al.</i> (2007)
2000	~17		
2012	24	对不同的冻土图集分析	Ran <i>et al.</i> (2012)
2010	41	利用地温和气温数据,结合经验和半经验模型	Zhang <i>et al.</i> (2019)
1950	48	1951—2017 年 258 个气象站资料,根据温度界定冻土分布	Zhang <i>et al.</i> (2021b)
2010	31		
2001—2018	68	卫星遥感的温度数据和温度统计模型	Zhang <i>et al.</i> (2021a)

原多年冻土区的范围约为 150 万 km², 多年冻土的实际面积约为 105 万 km².

4 准确界定多年冻土面积的必要性

多年冻土区和多年冻土实际分布区有着面积上的差异, 且差异可达 50%. 由于多年冻土总是埋藏在地表一定深度之下, 通过遥感等方法在空间上准确判断具有一定的难度, 而其偏远的地理位置和严酷的自然环境又限制了大规模的野外调查. 因此, 多年冻土实际分布区很难直接确定. 因此, 早期的研究只能先大致根据气象条件划分出多年冻土带, 在此基础上进一步开展研究. 在实际的多年冻土分布研究中, 往往是根据气象条件特别是气温、土壤质地等参数进行计算, 判断多年冻土存在的可能性 (Zou *et al.*, 2017; Cao *et al.*, 2019). 这种模拟得到的结果可以利用实际的调查, 例如野外踏勘法 (现场观察地表有无多年冻土典型地貌来判断)、坑探法 (直接挖掘土壤探坑, 观察有无地下冰)、钻探法 (机械钻探获取岩心, 判断是否冻结)、地温测量法 (对于因为地下冰含量低难以判断是否冻结或钻探过程时间过长, 可能会导致地下冰融化的地区, 在钻孔内布设温度探头, 直接测定地温)、地球物理勘探 (通过雷达、电磁、地震等物理探测方法, 判断地层信息, 结合其他方法验证) 等方法获得的结果进行验证 (赵林和盛煜, 2015).

对多年冻土区进行划分是有利于进一步开展多年冻土研究的. 然而, 很多研究者显然将多年冻土区理解为实际有多年冻土的地区, 并以此进一步开展相关研究, 就会得到错误的研究结果. 例如, 多年冻土退化会影响到区域的水文、植被、碳循环等重要过程. 由于这些领域的学者对多年冻土的认识不够深入, 因此经常会将多年冻土区等同于多年冻土的实际面积进行研究. 这一点在青藏高原多年冻土碳储量的研究上表现得尤为明显, 不同研究对于高原多年冻土碳的估算结果差异很大, 其中除了数据来源和扩展方法不同以外, 研究采用的面积也各不相同. 除了少数研究明确指出, 其估算的碳储量是指青藏高原约 150 万 km² 多年冻土区的碳储量 (Zhao *et al.*, 2018), 很多研究并未说明. 这就导致不同结果的比较非常困难. 同样, 如果以多年冻土区的面积来计算碳释放, 则会高估碳释放的量.

5 多年冻土面积变化研究需要注意的问题

多年冻土埋藏在地表以下, 且分布具有很大的空间差异. 除了受到气候条件影响以外, 多年冻土是否存在还受到局地条件例如坡度、坡向、植被、土壤颗粒组成等因素的影响 (Wu *et al.*, 2016b; Wu *et al.*, 2018). 因此, 目前准确的多年冻土分布资料仍然很难获得. 显然, 历史时期的多年冻土分布资料更不可能是准确无误的. 要在大范围的空间范围内分析多年冻土的变化, 仍然要依赖于模型模拟. 随着遥感资料产品精度的提升、实测资料的增加和模拟手段的进步, 多年冻土分布和热状况的区域模拟都取得了很大进步.

多年冻土模型在模拟现有多年冻土分布的准确性方面受到局地因素的影响. 现有的冻土模型主要依赖于气象数据来进行模拟的 (Riseborough *et al.*, 2008). 现存在的多年冻土大部分都是晚更新世 (13 万~11 万年前至 1 万年前) 到现在经历了多次的冻结、融化过程而形成的. 有的多年冻土已经存在了数十万年, 而有的则是几千年前的寒冷时期形成的 (邱国庆和程国栋, 1995). 换言之, 当前的气候条件只是通过水分和能量的传输而影响到多年冻土的存在状态, 而与多年冻土的形成并没有直接的关系. 举例来说, 兰州东部的马衔山山顶地区 (35°44'N, 103°58'E), 海拔约为 3 600 m. 在该纬度条件下, 是不会有多年冻土存在的. 从年均温来看, 2009—2013 年期间, 年均温为 -1.4 °C (Xie *et al.*, 2013), 在类似纬度条件下, 该年均温是不足以发育有多年冻土的. 然而, 由于该地区有着较厚的泥炭层, 泥炭层良好的隔热性能阻碍了热量的下传, 因而该地区多年冻土得到了很好的保存, 多年冻土厚度超过了 30 m, 且近年来并未观测到多年冻土温度的明显上升 (Xie *et al.*, 2013). 同样, 在祁连山东北部的俄堡地区 (38°00'N, 100°54'E), 2012—2015 年期间年均气温为 -0.79 °C (Mu *et al.*, 2017), 按目前多年冻土的温度模型来计算也不会发育有多年冻土. 与马衔山类似, 该地区厚达 50 cm 的泥炭层很好地保护了多年冻土, 该地区多年冻土厚达几十米 (Mu *et al.*, 2015). 可见, 现有的多年冻土模型在模拟多年冻土分布范围上受到局地因素的影响, 而准确的局地条件因素例如土壤有机碳含量、含冰量等

还依赖于大量的实际调查工作。

利用多年冻土模型模拟未来多年冻土的消失也有很大的不确定性。现存的多年冻土主要是历史时期形成的。那么,在短短的未来几十年中,已经存在了数万年的多年冻土是否就会大范围消失还很难判断。实际上,目前已有的报道中,观测到多年冻土的退化也主要是表现为地温升高、活动层厚度增加、热喀斯特地貌发展加速等现象,而多年冻土温度一旦上升到 0°C 附近后,其温度变化就会非常缓慢(Biskaborn *et al.*, 2019)。这是因为地下冰融化需要吸收大量的热量,从而阻止了地表能量进一步向下传输,因此减缓了多年冻土的退化过程(Xie *et al.*, 2013)。在实际的多年冻土研究中,尽管有钻孔温度在 0°C 附近,但很少有直接观测到多年冻土消失的报道。

6 结论

多年冻土是寒冷气候的产物,其变化会反馈于气候。多年冻土的快速退化可能会通过能量循环、水循环和碳循环影响到人类未来的生存与发展。在 20 世纪 50 年代以前,人类活动尚未引起气候快速变暖,多年冻土可能是相对稳定的。然而,近几十年来,多年冻土已经出现了明显变化,因此在气候变化研究领域需要予以关注。

多年冻土存在于地下,难以直接观测。因此人们划分了多年冻土带,在此基础上进一步研究多年冻土的实际分布和变化。从当前的研究资料来看,北半球陆地多年冻土带的面积为 $2\ 100\ \text{万}\ \text{km}^2$,海底多年冻土区约为 $200\ \text{万}\ \text{km}^2$ 。我国青藏高原多年冻土带的面积约为 $150\ \text{万}\ \text{km}^2$ 。北半球陆地实际多年冻土面积约为 $1\ 400\ \text{万}\ \text{km}^2$,我国青藏高原多年冻土的实际面积约为 $105\ \text{万}\ \text{km}^2$ 。但在其他地区,包括我国东北地区和我国其他高山区,多年冻土的实际分布面积不确定性还很大,在未来的研究中应该不断提高对北半球多年冻土实际分布面积的认识。多年冻土实际面积的分布除了通过野外调查之外,仍然需要以模型模拟为主,对于可能存在多年冻土的区域,需要获取更精确的有机碳含量、地下冰含量和导热率等参数;对于多年冻土面积变化的模拟,需要很好地考虑多年冻土冻融过程的冰水相变热量变化的物理过程描述,从而提高模拟的精度。

References

- Aalto, J., Karjalainen, O., Hjort, J., et al., 2018. Statistical Forecasting of Current and Future Circum-Arctic Ground Temperatures and Active Layer Thickness. *Geophysical Research Letters*, 45(10): 4889–4898. <https://doi.org/10.1029/2018gl078007>
- Arias, P.A., Bellouin, N., Coppola, E., et al., 2021. 2021: Technical Summary. In: Masson-Delmotte, V., ed., *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- Biskaborn, B.K., Smith, S.L., Noetzli, J., et al., 2019. Permafrost is Warming at a Global Scale. *Nature Communications*, 10: 264. <https://doi.org/10.1038/s41467-018-08240-4>
- Burke, E.J., Jones, C.D., Koven, C.D., 2013. Estimating the Permafrost-Carbon Climate Response in the CMIP5 Climate Models Using a Simplified Approach. *Journal of Climate*, 26(14): 4897–4909. <https://doi.org/10.1175/jcli-d-12-00550.1>
- Cao, B., Zhang, T.J., Wu, Q.B., et al., 2019. Permafrost Zonation Index Map and Statistics over the Qinghai-Tibet Plateau Based on Field Evidence. *Permafrost and Periglacial Processes*, 30(3): 178–194. <https://doi.org/10.1002/ppp.2006>
- Cheng, G.D., 1994. Progress of Glaciology and Geocrology in China in the Last 10 Years and Prospect. *Acta Geographica Sinica*, 49(Suppl. 1): 589–600 (in Chinese with English abstract).
- Dobinski, W., 2011. Permafrost. *Earth Science Reviews*, 108 (3–4): 158–169. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2011.06.007>
- Frederick, J.M., Buffett, B.A., 2014. Taliks in Relict Submarine Permafrost and Methane Hydrate Deposits: Pathways for Gas Escape under Present and Future Conditions. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 119(2): 106–122. <https://doi.org/10.1002/2013jf002987>
- Frederick, J.M., Buffett, B.A., 2015. Effects of Submarine Groundwater Discharge on the Present-Day Extent of Relict Submarine Permafrost and Gas Hydrate Stability on the Beaufort Sea Continental Shelf. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 120(3): 417–432. <https://doi.org/10.1002/2014jf003349>
- Gruber, S., 2012. Derivation and Analysis of a High-Resolution Estimate of Global Permafrost Zonation.

- The Cryosphere*, 6(1): 221–233. <https://doi.org/10.5194/tc-6-221-2012>
- Günther, F., Overduin, P. P., Sandakov, A. V., et al., 2013. Short- and Long-Term Thermo-Erosion of Ice-Rich Permafrost Coasts in the Laptev Sea Region. *Biogeosciences*, 10(6):4297–4318. <https://doi.org/10.5194/bg-10-4297-2013>
- Huang, F., Xu, J.F., Wang, B.D., et al., 2020. Destiny of Neotethyan Lithosphere during India-Asia Collision. *Earth Science*, 45(8): 2785–2804 (in Chinese with English abstract).
- IPCC, 2019. IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate. <https://www.ipcc.ch/srocc/download/>
- Jin, H.J., Yu, Q.H., Lü, L.Z., et al., 2007. Degradation of Permafrost in the Xing'anling Mountains, Northeastern China. *Permafrost and Periglacial Processes*, 18(3): 245–258. <https://doi.org/10.1002/ppp.589>
- Koven, C.D., Ringeval, B., Friedlingstein, P., et al., 2011. Permafrost Carbon-Climate Feedbacks Accelerate Global Warming. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 108(36): 14769–14774. <https://doi.org/10.1073/pnas.1103910108>
- Lantuit, H., Overduin, P.P., Couture, N., et al., 2012. The Arctic Coastal Dynamics Database: A New Classification Scheme and Statistics on Arctic Permafrost Coastlines. *Estuaries & Coasts*, 35(2): 383–400. <https://doi.org/10.1007/s12237-010-9362-6>
- Li, X.B., Ji, J.L., Cao, Z.M., et al., 2021. The Climatic Significance of the Color of the Paleo-Neogene Fluvial and Lacustrine Sediments in the Northern Qaidam Basin. *Earth Science*, 46(9): 3278–3289 (in Chinese with English abstract).
- Liu, S., Wu, T., Wang, X., et al., 2020. Changes in the Global Cryosphere and Their Impacts: A Review and New Perspective. *Sciences in Cold and Arid Regions*, 12(6): 343–354. <https://doi.org/10.3724/sp.j.1226.2020.00343>
- Luo, D.L., Jin, H.J., Lin, L., et al., 2012. Degradation of Permafrost and Cold-Environments on the Interior and Eastern Qinghai Plateau. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 34(3): 538–546 (in Chinese with English abstract).
- Ma, Q., Jin, H.J., 2020. Impacts of Climate Warming on Soil Organic Carbon Pools in Permafrost Regions. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 42(1): 91–10 (in Chinese with English abstract).
- Maslakov, A., Kraev, G., 2016. Erodibility of Permafrost Exposures in the Coasts of Eastern Chukotka. *Polar Science*, 10(3): 374–381. <https://doi.org/10.1016/j.polar.2016.04.009>
- Mu, C.C., Abbott, B.W., Zhao, Q., et al., 2017. Permafrost Collapse Shifts Alpine Tundra to a Carbon Source But Reduces N₂O and CH₄ Release on the Northern Qinghai-Tibetan Plateau. *Geophysical Research Letters*, 44(17): 8945–8952. <https://doi.org/10.1002/2017gl074338>
- Mu, C.C., Zhang, T.J., Wu, Q.B., et al., 2015. Carbon and Nitrogen Properties of Permafrost over the Eboling Mountain in the Upper Reach of Heihe River Basin, Northwestern China. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*, 47(2): 203–211. <https://doi.org/10.1657/aaar00c-13-095>
- Ni, J.E., Wu, T.H., Zhu, X.F., et al., 2021. Simulation of the Present and Future Projection of Permafrost on the Qinghai-Tibet Plateau with Statistical and Machine Learning Models. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 126(2): e2020JD033402. <https://doi.org/10.1029/2020jd033402>
- Niu, F.J., Cheng, G.D., Ni, W.K., et al., 2005. Engineering-Related Slope Failure in Permafrost Regions of the Qinghai-Tibet Plateau. *Cold Regions Science and Technology*, 42(3): 215–225. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2005.02.002>
- Obu, J., 2021. How Much of the Earth's Surface is Underlain by Permafrost? *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 126(5): e2021JF006123. <https://doi.org/10.1029/2021jf006123>
- Obu, J., Westermann, S., Bartsch, A., et al., 2019. Northern Hemisphere Permafrost Map Based on TTOP Modeling for 2000–2016 at 1 km² Scale. *Earth-Science Reviews*, 193: 299–316. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2019.04.023>
- Peng, C.Y., Sheng, Y., Wu, J.C., et al., 2021. Simulation of the Permafrost Distribution in the Qilian Mountains. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 43(1): 158–169 (in Chinese with English abstract).
- Qiu, G.Q., Cheng, G.D., 1995. Permafrost in China: Past and Present. *Quaternary Sciences*, 15(1): 13–22 (in Chinese with English abstract).
- Ran, Y.H., Li, X., Cheng, G.D., et al., 2012. Distribution of Permafrost in China: An Overview of Existing Permafrost Maps. *Permafrost and Periglacial Processes*, 23(4): 322–333. <https://doi.org/10.1002/ppp.1756>
- Riseborough, D., Shiklomanov, N., Etzelmüller, B., et al., 2008. Recent Advances in Permafrost Modelling. *Perma-*

- frost and Periglacial Processes*, 19(2): 137—156. <https://doi.org/10.1002/ppp.615>
- Sayed, S.S., Abbott, B.W., Thornton, B.F., et al., 2020. Subsea Permafrost Carbon Stocks and Climate Change Sensitivity Estimated by Expert Assessment. *Environmental Research Letters*, 15(12): 124075. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/abcc29>
- Schaefer, K., Zhang, T.J., Bruhwiler, L., et al., 2011. Amount and Timing of Permafrost Carbon Release in Response to Climate Warming. *Tellus B*, 63(2): 165—180. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0889.2011.00527.x>
- Schneider von Deimling, T., Meinshausen, M., Levermann, A., et al., 2012. Estimating the Near-Surface Permafrost-Carbon Feedback on Global Warming. *Biogeosciences*, 9(2): 649—665. <https://doi.org/10.5194/bg-9-649-2012>
- Schuur, E.A.G., McGuire, A.D., Schädel, C., et al., 2015. Climate Change and the Permafrost Carbon Feedback. *Nature*, 520(7546): 171—179. <https://doi.org/10.1038/nature14338>
- Wu, Q.B., Liu, Y.Z., Zhang, J.M., et al., 2002. A Review of Recent Frozen Soil Engineering in Permafrost Regions along Qinghai-Tibet Highway, China. *Permafrost and Periglacial Processes*, 13(3): 199—205. <https://doi.org/10.1002/ppp.420>
- Wu, Q.B., Zhang, Z.Q., Gao, S.R., et al., 2016a. Thermal Impacts of Engineering Activities and Vegetation Layer on Permafrost in Different Alpine Ecosystems of the Qinghai-Tibet Plateau, China. *The Cryosphere*, 10(4): 1695—1706. <https://doi.org/10.5194/tc-10-1695-2016>
- Wu, X.D., Zhao, L., Fang, H.B., et al., 2016b. Environmental Controls on Soil Organic Carbon and Nitrogen Stocks in the High-Altitude Arid Western Qinghai-Tibetan Plateau Permafrost Region. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 121(1): 176—187. <https://doi.org/10.1002/2015jg003138>
- Wu, X.D., Zhao, L., Hu, G.J., et al., 2018. Permafrost and Land Cover as Controlling Factors for Light Fraction Organic Matter on the Southern Qinghai-Tibetan Plateau. *Science of the Total Environment*, 613/614: 1165—1174. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.09.052>
- Xie, C.W., Gough, W.A., Tam, A., et al., 2013. Characteristics and Persistence of Relict High-Altitude Permafrost on Mahan Mountain, Loess Plateau, China. *Permafrost and Periglacial Processes*, 24(3): 200—209. <https://doi.org/10.1002/ppp.1776>
- Zhang, F., Mu, M., Fan, C.Y., et al., 2020. Studies of Permafrost Carbon Cycle in the Third Polar and Arctic Regions. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 42(1): 170—181 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, T., Barry, R.G., Knowles, K., et al., 1999. Statistics and Characteristics of Permafrost and Ground-Ice Distribution in the Northern Hemisphere. *Polar Geography*, 23(2): 132—154. <https://doi.org/10.1080/10889379909377670>
- Zhang, T., Heginbottom, J.A., Barry, R.G., et al., 2000. Further Statistics on the Distribution of Permafrost and Ground Ice in the Northern Hemisphere. *Polar Geography*, 24(2): 126—131. <https://doi.org/10.1080/10889370009377692>
- Zhang, Y.Y., Zang, S.Y., Li, M.A., et al., 2021a. Spatial Distribution of Permafrost in the Xing'an Mountains of Northeast China from 2001 to 2018. *Land*, 10(11): 1127. <https://doi.org/10.3390/land10111127>
- Zhang, Z.Q., Wu, Q.B., Hou, M.T., et al., 2021b. Permafrost Change in Northeast China in the 1950s—2010s. *Advances in Climate Change Research*, 12(1): 18—28. <https://doi.org/10.1016/j.accre.2021.01.006>
- Zhang, Z.Q., Wu, Q.B., Xun, X.Y., et al., 2019. Spatial Distribution and Changes of Xing'an Permafrost in China over the Past Three Decades. *Quaternary International*, 523: 16—24. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2019.06.007>
- Zhao, L., Cheng, G.D., Li, S.X., et al., 2000. Thawing and Freezing Processes of Active Layer in Wudaoliang Region of Tibetan Plateau. *Chinese Science Bulletin*, 45(23): 2181—2187. <https://doi.org/10.1007/bf02886326>
- Zhao, L., Hu, G.J., Zou, D.F., et al., 2019. Permafrost Changes and Its Effects on Hydrological Processes on Qinghai-Tibet Plateau. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 34(11): 1233—1246 (in Chinese with English abstract).
- Zhao, L., Sheng, Y., 2015. Permafrost Survey Manual. Science Press, Beijing (in Chinese).
- Zhao, L., Wu, X.D., Wang, Z.W., et al., 2018. Soil Organic Carbon and Total Nitrogen Pools in Permafrost Zones of the Qinghai-Tibetan Plateau. *Scientific Reports*, 8: 3656. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-22024-2>
- Zhou, Y.W., 2000. Geocryology in China. Science Press, Beijing (in Chinese).
- Zhuang, Q.L., Melillo, J.M., Sarofim, M.C., et al., 2006. CO₂ and CH₄ Exchanges between Land Ecosystems and the Atmosphere in Northern High Latitudes over the 21st Century. *Geophysical Research Letters*, 33(17): L17403. <https://doi.org/10.1029/2006gl026972>

Zou, D. F., Zhao, L., Sheng, Y., et al., 2017. A New Map of Permafrost Distribution on the Tibetan Plateau. *The Cryosphere*, 11(6):2527–2542. <https://doi.org/10.5194/tc-11-2527-2017>

附中文参考文献

程国栋, 1994. 中国冰川学和冻土学研究近 10 年进展和展望. *地理学报*, 49(增刊 1):589–600.

黄丰, 许继峰, 王保弟, 等, 2020. 印度—亚洲大陆碰撞过程中新特提斯洋岩石圈的命运. *地球科学*, 45(8):2785–2804.

李星波, 季军良, 曹展铭, 等, 2021. 柴达木盆地北缘古—新近纪河湖相沉积物颜色的气候意义. *地球科学*, 46(9):3278–3289.

罗栋梁, 金会军, 林琳, 等, 2012. 青海高原中、东部多年冻土及寒区环境退化. *冰川冻土*, 34(3):538–546.

马蔷, 金会军, 2020. 气候变暖对多年冻土区土壤有机碳库的影响. *冰川冻土*, 42(1):91–103.

彭晨阳, 盛煜, 吴吉春, 等, 2021. 祁连山区多年冻土空间分布模拟. *冰川冻土*, 43(1):158–169.

邱国庆, 程国栋, 1995. 中国的多年冻土:过去与现在. *第四纪研究*, 15(1):13–22.

张凤, 母梅, 范成彦, 等, 2020. 从第三极到北极:多年冻土碳循环研究进展. *冰川冻土*, 42(1):170–181.

赵林, 胡国杰, 邹德富, 等, 2019. 青藏高原多年冻土变化对水文过程的影响. *中国科学院院刊*, 34(11):1233–1246.

赵林, 盛煜, 2015. 多年冻土调查手册. 北京:科学出版社.

周幼吾, 2000. 中国冻土. 北京:科学出版社.