

# 泛北极地区冻土活动层厚度变化及影响因素研究

闫璇

哈尔滨师范大学地理科学学院, 黑龙江 哈尔滨

收稿日期: 2023年12月6日; 录用日期: 2024年1月12日; 发布日期: 2024年1月19日

## 摘要

北极地区是冻土广泛分布的地区, 针对泛北极地区冻土退化的现象进行分析, 对于预测全球气候的改变, 植被类型和覆盖度的剖析具有十分重要的意义。现如今, 随着工业和科技的飞速发展, 全球变暖的趋势日益明显, 这可能使地球上的多年冻土加速退化。并且多年冻土极易受气温的影响, 不同植被类型冻土活动层也有所不同。本研究基于站点监测数据MODIS (Moderate resolution Imaging Spectroradiometer) 数据(MCD12Q1和MCD12C1产品)对泛北极地区活动层厚度进行研究。结果表明: 北极地区活动层厚度存在纬度地带性, 全球气候的变暖与活动层厚度的增加有极大关系, 且不一样的植被类型所对应的活动层厚度也不尽相同(林地最高, 灌丛最低)。该结果对于深刻理解北半球高纬度地区的冻土冻融格局有很大帮助, 而且可以为冻土区的资源和环境保护提供有效的支持。

## 关键词

泛北极地区, 活动层厚度, 气候变化, 植被类型

# Research on the Variation of Active Permafrost Thickness and Its Influencing Factors in the Pan-Arctic Region

Xuan Yan

College of Geographical Science, Harbin Normal University, Harbin Heilongjiang

Received: Dec. 6<sup>th</sup>, 2023; accepted: Jan. 12<sup>th</sup>, 2024; published: Jan. 19<sup>th</sup>, 2024

## Abstract

The Arctic region is a region where permafrost is widely distributed. The analysis of permafrost

degradation in the Pan-Arctic region is of great significance for the prediction of global climate change, and the analysis of vegetation types and coverage. Nowadays, with the rapid development of industry and technology, the trend of global warming is becoming increasingly obvious, which may accelerate the degradation of permafrost on Earth. Moreover, permafrost is easily affected by air temperature, and the active layer of permafrost is different with different vegetation types. This study is based on MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) data (MCD12Q1 and MCD12C1 products) to study the active layer thickness in the pan-Arctic region. The results show that the thickness of active layer in the Arctic region is latitudinal and zonal, and there is a great relationship between the global warming and the increase of active layer thickness, and the thickness of active layer is different for different vegetation types (forestland is the highest, shrub is the lowest). The results are of great help to understand the pattern of frozen soil freeze-thaw in the northern hemisphere, and can provide effective support for the protection of resources and environment in the frozen soil region.

## Keywords

Pan-Arctic, Active Layer Thickness, Climate Change, Vegetation Types

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

冻土，又称为“无树的平原”，是指负温或零温，并且含有冰的各种岩石和土体[1]，是一种易受温度影响的土体。通常可分为短时冻土、季节冻土以及多年冻土(又称永久冻土，指的是至少连续两年保持完全冻结的任何地面) [2]。活动层是指位于地壳的上层，每年在温度低时冻结，在炎热季节融化[3]。多年冻土是寒季独有的特征，但近年来全世界气候变暖使得全球多年冻土的广泛退化，对生态环境和全球气候有非常严重的影响。多年冻土主要分布在高纬度和高海拔地区，占北半球陆地面积的四分之一[4]，尤其是北极地区分布尤为广泛。这也使北极成为冻土研究的重要地区[5]。北极地区主要就是指北半球靠北的地方，是地球的寒带地区。北极地区包括整个北冰洋以及格陵兰岛(丹麦领土)、加拿大、美国阿拉斯加州、俄罗斯、挪威、瑞典、芬兰和冰岛八个国家的部分地区[5]。北极地区主要由北冰洋以及围绕在其周围的有较少植被生长的冻土地带所构成。其常年低温的环境是该地区冻土广布的重要因素。北极地区是对气候变化最为敏感的区域之一，多年来都是生态环境等研究方面的热点。泛北极冻土地带作为全球碳库的重要来源之一，它对气候变化影响有着自己独特的方式。虽然近期全球气候变暖现象得到一定程度的遏制[6]，但北极地区温度的升高却仍表现出显著的加速趋势(0.34℃/十年) [7]。大幅度且快速的北极增温状况，造成多年冻土分布范围的快速缩减[8]和冻土活动层厚度的增加[9]。温度的上升会加剧冻土的退化，并且冻土的退化可能会释放冻土内的碳元素。而大气中碳元素所占比例的增加更会加速冻土活动层厚度的增加，并且反过来加速促进全球变暖，这是一个恶性循环的过程。多年冻土区碳元素含量丰富，其碳储量变化及碳反馈机制是全球气候变化研究中的重要领域[10]。冻土对人类日常生活，生态环境的发展以及气候的变化都有着十分深远的影响。对于整个全球都具有十分重要的意义。因此，对北极地区冻土活动层厚度变化的深入研究，有助于我们更深入的了解全球气候变化推动土退化的影响，引起人们对冻土资源的重视，并建立相关的监测设备和保护措施。

在冻土研究的历史进程中，关于冻土研究最早开展于 18 世纪 30 年代[11]。第一张较为单一的冻土分

区图出现在 19 世纪末的苏联。然而北美在 20 世纪初才开始对冻土进行初步研究，并在当时研究出第一张属于北美的冻土分区图[12]。此前，冻土分布图多为小比例尺地图，国内外专家所研究的地域都是基于相关地区的南界进行圈定的。20 世纪中叶以后，冻土分布图的涉及的研究区域逐渐变大、范围逐渐变广。随着科技的发展，航空技术在冻土研究中逐渐发挥作用，随之出现更内容更新颖、数据更详尽的冻土分布图。冻土的分布区的生存环境并不适合人类生活。因为其主要分布在海拔较高、风力极大的恶劣环境中，所以对冻土数据进行采集是特别困难的，而且需要耗费较长时间。所以，在社会飞速发展和人类的进步需要，以往传统的冻土分布图制作方式就有些落后了。近些年来，随着科技发展，国内外专家对于不同空间尺度进行了冻土分布模型的研究。同时，通过遥感(RS, Remote Sensing)获取信息和数据的方式受到大家的欢迎，是极其重要的信息来源。虽然卫星遥感图像的空间分辨率较低，但它的全天候，多时相等特性使其在获得冻土相关信息方面优势很大。我国的冻土主要分布于大小兴安岭、青藏高原地带，以及一些高海拔地区。尤其是我国东北地区，由于地理位置的原因，冻土活动层厚度变化对气候变化异常敏感[13]。寒区的工程建设与发展对冻土的退化和生态环境的发展有很大的影响，但同时也对区域冻土的研究产生一定的促进作用。自 20 世纪 50 年代起就有学者开始对冻土进行深入研究与考察[14]。1958 年组建高山冰雪利用研究队以应召国家发展西北的需要。1981 年，郭东信[15]等绘制了中国东北冻土分布图，而 20 世纪 60 年代才对青藏高原冻土图开始进行绘制。1975 年，童伯良[16]等编制了第一张中国冻土分布图。随着科学技术的丰富，以及数据获取的全面和精准，我国许多科学家所绘制的冻土图则是通过模型模拟出来的。模型的出现方便了许多冻土图的绘制以及对活动层厚度变化的预测。对于冻土活动层厚度的探究，国内外逐渐采用瞬变电磁对冻土厚度及分布特征进行探究，研究成果应用广泛。对于影响活动层厚度变化的驱动因子的研究，国外对泛北极高纬度地区水文、植被对多年冻土退化的研究较多，如 White 等[17]通过对阿拉斯加北部流域的长时间观测，得出积雪融化与活动层变化对地下径流的影响；Fedorov 等[18]论证了不同植被类型对冻土活动层厚度的影响。但目前研究内容范围较小，并没有从大尺度对整个泛北极地区进行多种影响因素研究。

因此本研究选取北极地区为研究区域，通过利用多年的站点监测数据进行长时间序列探究，剖析北极地区冻土资源的时空变化趋势。并通过植被覆盖度和植被类型数据，揭示不同植被类型与活动层厚度之间的关系。为保障北极地区冻土资源对人类的经济效益得以延续以及为保护北极地区冻土资源和当地的生态环境提供理论依据。从而进一步保障全球生态环境的可持续发展。

## 2. 研究区概况与数据

### 2.1. 研究区概况

本文的研究区不只是北极点，而是大致位于北纬 60 度以北的陆地地区，四周被亚洲、欧洲和北美洲北部的多年永久冻土区所围绕。北极地区占地面积 2100 万平方千米，之中陆地面积约为三分之一。气候以极地冰原气候为主，北极地区大部分为北冰洋，陆地地形主要以山地为主。北极地区全年寒冷，并且还会出现极夜现象。冬季的最低气温可以达到零下 50℃，年降水量平均 100~200 mm，多数地区全年冰封。丰富的自然资源也因北极地区特殊的自然环境而存在，例如石油、天然气、金刚石等等。并且拥有重要的战略地位。

### 2.2. 数据

#### 2.2.1. 冻土数据

本研究选取的冻土数据主要包括冻土分布及活动层厚度的站点监测数据。其中活动层厚度数据来自 CALM 站点数据[19]。本研究共选取 64 个站点数据，时间为 2001 年~2016 年。

### 2.2.2. 气温数据

本研究所用的温度数据来源于美国国家气候数据中心 NCDC (National climatic Data Center)。为分析温度与冻土活动层厚度之间的关系, 选取了 2001~2016 年年均温度。并对温度数据进行筛选, 剔除异常值, 共选取 150 个站点进行分析研究。

### 2.2.3. 植被数据

本研究选用的植被数据来源于美国国家航空航天局(<https://landsweb.modaps.eosdis.nasa.gov>)提供的 MODIS 土地覆盖产品(MCD12Q1 和 MCD12C1)。其共包含 18 种土地覆盖类型, 所使用的数据时间分别为 2012 年和 2016 年。本研究 16 类植被类型重分类为林地、草地、湿地、草原和灌丛 5 大类。

## 3. 研究方法

### 3.1. 基于 ARCGIS 的研究分析

本文的研究主要应用 ARCGIS 软件, 包括从数据处理到图像制作和输出。对于所获取的监测站点数据, 首先清除掉缺测站点数据, 然后将余下的站点数据利用 ARCGIS 与北极地区的影像进行叠合。根据北极地区所包含的区域进行属性选取, 获取行政区划, 最后得到监测站点的空间分布图。在对活动层厚度进行分析时对各监测站点多年活动层厚度求取平均值, 结合冻土分布图, 并根据所划分的活动层厚度区间进行分析, 出图。

在对植被类型进行分析时, 首先将所获得的数据进行拼接, 然后对数据进行预处理, 对图像进行增强处理, 然后将利用 ArcGIS 将数据转换为栅格数据。

### 3.2. 基于 Excel 的折线图分析

本文在对活动层时间变化以及气温对活动层厚度的影响中应用到了折线图的分析方法。折线图的分析有助于更直观的显示出活动层厚度的变化特征, 以及与其他变量之间的关系。在制图过程中, 首先将监测站点数据的属性表从 ARCGIS 中导出, 将温度、时间以及活动层厚度数据导入 Excel 中。

## 4. 泛北极地区冻土活动层厚度的时空变化

### 4.1. 时间变化特征

根据图 1 所显示, 2001~2016 年泛北极地区多年冻土活动层年平均厚度在 56.8~73.5 cm 之间。增长趋势有波动, 增长率约为 1.1 cm/a。由此可知每 10 年泛北极地区多年冻土活动厚度平均增加 1.1 cm。并且冻土活动层厚度的总体趋势为逐渐增加。

### 4.2. 空间变化特征

本文通过对 2016 年研究区冻土活动层的空间分布情况进行分析, 来解析冻土活动层厚度的空间分布规律。我们能发现: 冻土活动层厚度的变化呈现出一定的纬度地带性, 总体上表现为由北向南增加的特点。活动层厚度较大的区域主要集中在低纬度地区。这在 50°N 蒙古上界表现比较显著, 而较小的厚度集中分布在加拿大靠北极附近地区。

## 5. 多年冻土活动层厚度变化的影响因素

### 5.1. 气温变化对冻土活动层厚度的影响

气温的波动对冻土的冻融过程影响有强相关性, 且不同季节温度变化对多年冻土冻融的作用效果也

是不同的，并且认为夏季温度对其影响效果显著。为此，本文对年平均气温对活动层厚度变化的作用进行了分析。年平均温度与多年冻土活动层厚度变化的关系，如下图 2 所示。

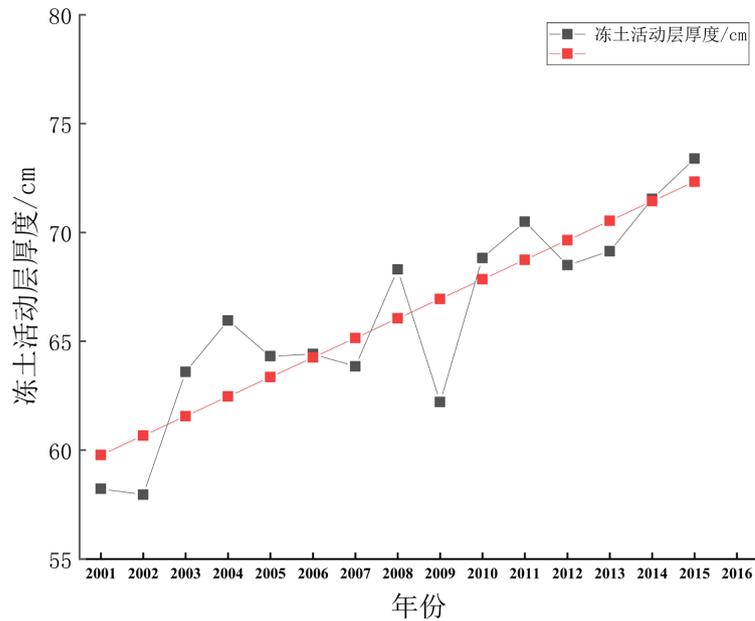


Figure 1. Annual mean permafrost active layer thickness changes in all permafrost regions from 2001 to 2016

图 1. 2001~2016 年全部冻土区年平均多年冻土活动层厚度变化情况

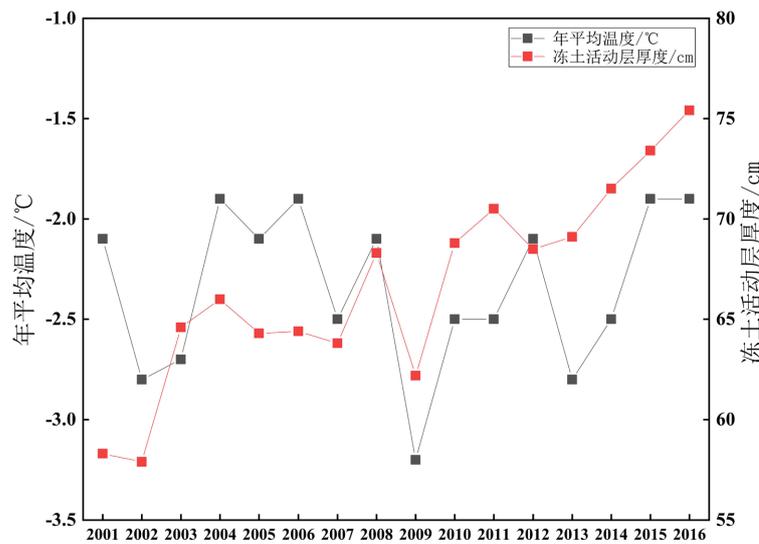


Figure 2. Relationship between annual mean air temperature and the thickness of permafrost active layer

图 2. 年平均气温与冻土活动层厚度的关系

1998 年 7 月，全球平均温度为 16.5℃ (美国国家大气与海洋总署公布)。自上个世纪以来，全球气温便普遍开始升高。在最冷的南北极地区，曾经测量得到零下 89.2℃ 的低温。但近些年来，由于温室效应的影响，全球平均气温度逐年升高。2016 年的平均气温升高了近 1.4 摄氏度。并且根据 2001 年~2016 年

的气象站点数据可以发现,近 20 年来北极地区主要呈现出增温趋势。从整体来看冻土活动层厚度与气温变化呈正相关。这也充分证明泛北极地区气温的升高导致地温升高,从而引起活动层厚度的增加。但同时,也应注意到气温和冻土活动层厚度增加的关系并不是完全呈现出正相关。这表明气温并不是影响冻土退化的唯一因素。

## 5.2. 植被类型与冻土活动层厚度之间的关系

植被类型是气候条件的表征之一。这主要与太阳辐射和降水量以及其他影响因素息息相关。由于地球上的各个区域气候条件不尽相同,因而生长的植被也是不同的。植被状况也是其所生长土质好坏的一种体现。不同植被会通过多种作用影响冻土冻融过程进而影响活动层厚度[19]。基于 2016 年土地利用覆被数据,对林地、草地、湿地、草原和灌丛 5 种植被的多年冻土活动层的平均厚度进行整理,得出不同植被类型的活动层厚度有所不同[20]。林地是所有植被类型中平均活动层厚度最高,而灌丛则最低。具体数值如表 1 所示。

**Table 1.** Active layer thickness of different vegetation types

**表 1.** 不同植被类型活动层厚度

植被类型	冻土活动层厚度/cm
林地	97.4
草地	97.1
永久湿地	96.7
草原	91.3
灌丛	60.0

## 6. 结论与展望

### 6.1. 主要结论

本文结合 2001~2016 年多年冻土监测站点数据,地表温度数据以及 2012 和 2016 年的植被类型数据,对北极地区的活动层厚度的变化进行了研讨,并分析了其时空变化规律及主要影响因素。主要结论如下:

(1) 泛北极地区冻土活动层厚度随着年份的增长,也呈现出了波动式增长。并且随着时间的发展,活动层的厚度表现出显著的增大。与全球气候变暖有很大相关性。

(2) 泛北极地区活动层厚度的分布具有明显的空间差异性。主要表现为纬度地带性差异。从空间分布上可以看出,冻土活动层厚度较大的地区主要分布在较低纬度。

(3) 气温变化影响冻土退化。随着全球气候变暖,冻土发生明显退化,主要表现为活动层厚度的增加。

(4) 植被类型的不同,所对应的多年冻土活动层厚度存在差异。这不仅与植被类型有关,也与植被覆盖度相关。植被对太阳光的吸收减少了对地面直接的太阳辐射。因此植被的保护对冻土资源的保护有一定作用。

### 6.2. 不足

(1) 站点数据的选取具有主观因素,这会影响研究的准确性和客观性。

(2) 研究所用数据为全球平均温度数据,不具有代表性。因此得到的有关冻土活动层厚度与温度变化的关系会存在一定的误差。

(3) 研究区内植被覆盖度较低,植被类型较单一。因此在探究植被类型与冻土活动层厚度的关系时产

生了一定的影响。

(4) 多年冻土的退化并不是受单一因素影响, 本研究所选影响因素过少, 研究不够全面。

### 6.3. 展望

针对以上不足, 在利用所处理的数据对研究地域进行分析时, 以后的研究更要注重优质数据的选取, 寻找更加精准的数据集, 以及致力于获取动态的植被类型数据。并且在研究中运用模型来对结果进行验证, 以及对冻土活动层厚度进行模拟。同时, 针对其他影响因素, 也应进行进一步的研究, 从而提高研究结果的准确性、科学性以及全面性。

### 参考文献

- [1] 秦大河, 姚檀栋, 丁永健, 等. 冰冻圈科学辞典[M]. 北京: 气象出版社, 2014.
- [2] 周幼吾, 郭东信, 邱国庆, 等. 中国冻土[M]. 北京: 科学出版社, 2000.
- [3] 张中琼, 吴青柏. 气候变化情景下青藏高原多年冻土活动层厚度变化预测[J]. 冰川冻土, 2012, 34(3): 505-511.
- [4] 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**, 132-154. <https://doi.org/10.1080/10889379909377670>
- [5] 叶滨鸿, 程杨, 王利, 杨林生. 北极地区地缘关系研究综述[J]. 地理科学进展, 2019, 38(4): 489-505.
- [6] Kosaka, Y. and Xie, S.P. (2013) Recent Global-Warming Hiatus Tied to Equatorial Pacific Surface Cooling. *Nature*, **501**, 403-407. <https://doi.org/10.1038/nature12534>
- [7] Guo, D.L., Li, D. and Hua, W. (2018) Quantifying Air Temperature Evolution in the Permafrost Region from 1901 to 2014. *International Journal of Climatology*, **38**, 66-76. <https://doi.org/10.1002/joc.5161>
- [8] 曹云锋, 梁顺林. 北极地区快速升温的驱动机制研究进展[J]. 科学通报, 2018, 63(26): 2757-2771.
- [9] 孔莹, 王澄海. 北半球多年冻土及雪水当量对 1.5 °C 温升的响应[C]//中国气象学会. 第 34 届中国气象学会年会 S3 冰冻圈对全球气候变化的响应与反馈论文集. 北京: 中国气象学会, 2017: 4.
- [10] 张凤, 母梅, 范成彦, 贾麟, 牟翠翠, 赵倩, 李丽丽, 彭小清, 张廷军. 从第三极到北极: 多年冻土碳循环研究进展[J]. 冰川冻土, 2020, 42(1): 170-181.
- [11] 王坤, 陈凤臻, 陈立春, 魏斌. 基于 RS/GIS 的冻土分布模拟研究现状[J]. 赤峰学院学报(自然科学版), 2012, 28(20): 122-124.
- [12] 李倩. 全球变暖背景下冻土变化研究综述[J]. 吉林气象, 2013(1): 25-28+44.
- [13] 周晓宇, 赵春雨, 李娜, 刘鸣彦, 崔妍, 敖雪. 东北地区冬半年积雪与气温对冻土的影响[J]. 冰川冻土, 2021, 43(4): 1027-1039.
- [14] 郭东信, 王绍令, 鲁国威, 戴竞波, 李恩英. 东北大小兴安岭多年冻土分区[J]. 冰川冻土, 1981(3): 1-9.
- [15] 童伯良. 中国东北部的冰楔[J]. 冰川冻土, 1993(1): 41-46.
- [16] Streletskiy, D.A., Shiklomanov, N.I., Nelson, F.E. and Klene, A.E. (2008) Thirteen Years of Observations at Alaskan CALM Sites: Long-Term Active Layer and Ground Surface Temperature Trends. In: *Proceedings of the Ninth International Conference on Permafrost*, University of Alaska Press, Fairbanks, 1727-1732.
- [17] White, D.M., Craig Gerlach, S., Loring, P., et al. (2007) Food and Water Security in a Changing Arctic Climate. *Environmental Research Letters*, **2**, Article ID: 045018. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/2/4/045018>
- [18] Fedorov, A.N., Konstantinov, P.Y., Vasilyev, N.F. and Shestakova, A.A. (2019) The Influence of Boreal Forest Dynamics on the Current State of Permafrost in Central Yakutia. *Polar Science*, **22**, Article ID: 100483. <https://doi.org/10.1016/j.polar.2019.100483>
- [19] 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.
- [20] 蔡红艳, 韩冬锐, 杨林生, 陈慕琳, 杨小唤. 泛北极地区多年冻土活动层厚度演变[J]. 遥感学报, 2020, 24(8): 1045-1057.