

# 北半球冻土顶板温度与活动层厚度 $0.625^{\circ} \times 0.4712^{\circ}$ 栅格数据集 (2015–2100) 研发方法

吴潇然<sup>1,2</sup>, 赵娜<sup>1,2,3\*</sup>, 叶延磊<sup>4</sup>

1. 中国科学院地理科学与资源研究所资源与环境信息系统国家重点实验室, 北京 100101; 2. 中国科学院大学资源与环境学院, 北京 100049; 3. 江苏省地理信息资源开发与利用协同创新中心, 南京 210023;  
4. 正元地理信息集团股份有限公司, 北京 101300

**摘要:** 评估当前和未来多年冻土空间分布和动态变化对全球碳循环模拟、气候变化预测以及工程风险评估至关重要。本文使用经广泛验证和应用的半经验模型 Kudryavtsev 方法, 综合考虑温度、积雪、植被、土壤等因素对冻土的影响, 以国际耦合模式比较计划第六阶段 (CMIP6) 模式模拟结果和 SoilGrids 2.0 数据集等作为输入, 计算了 2015–2100 年北半球冻土顶板温度与活动层厚度在 SSP126、SSP245、SSP370 和 SSP585 四种不同情景下的逐年时间序列数据, 并根据顶板温度计算了北半球冻土面积。该数据集填补了未来不同情境下冻土分布预测数据的空缺, 为冻土退化、气候变化、北极生态等相关研究提供了数据参考。数据集包括 2015–2100 年逐年以下实验数据: (1) 冻土顶板温度数据; (2) 活动层厚度数据; (3) 冻土面积数据。数据集存储为.tif 和.xls 格式, 空间分辨率为  $0.625^{\circ} \times 0.4712^{\circ}$ , 由 690 个数据文件组成, 数据量为 35.6 MB。

**关键词:** 冻土; 冻土顶板温度; 活动层厚度; Kudryavtsev; CMIP6; 北半球, 预测

**DOI:** <https://doi.org/10.3974/geodp.2022.03.19>

**CSTR:** <https://cstr.escience.org.cn/CSTR:20146.14.2022.03.19>

**数据可用性声明:**

本文关联实体数据集已在《全球变化数据仓储电子杂志 (中英文)》出版, 可获取:

<https://doi.org/10.3974/geodb.2022.08.01.V1> 或 <https://cstr.escience.org.cn/CSTR:20146.11.2022.08.01.V1>.

## 1 前言

多年冻土是指温度低于  $0^{\circ}\text{C}$ , 且至少连续冻结两年的岩土层<sup>[1]</sup>, 它占据全球约 25% 的陆地面积<sup>[2]</sup>, 对北半球的大部分区域产生了不同程度的影响<sup>[3]</sup>。冻土与大气圈、水圈、岩石圈等多个圈层有紧密的联系, 极易受到外界影响并产生强烈反馈。受全球气候变暖影响, 多年冻土面积萎缩和活动层厚度增加等问题在近几年日益突出<sup>[4]</sup>。多年冻土的退化将带

收稿日期: 2022-07-20; 修订日期: 2022-09-17; 出版日期: 2022-09-25

基金项目: 中国科学院 (XDA20030203)

\*通讯作者: 赵娜, 中国科学院地理科学与资源研究所, zhaon@lreis.ac.cn

数据引用方式: [1] 吴潇然, 赵娜, 叶延磊. 北半球冻土顶板温度与活动层厚度  $0.625^{\circ} \times 0.4712^{\circ}$  栅格数据集 (2015–2100) 研发方法 [J]. 全球变化数据学报, 2022, 6(3): 479–486. <https://doi.org/10.3974/geodp.202203.19>. <https://cstr.escience.org.cn/CSTR:20146.14.2022.03.19>.  
[2] 吴潇然, 赵娜. 北半球冻土顶板温度与活动层厚度  $0.625^{\circ} \times 0.4712^{\circ}$  栅格数据集 (2015–2100) [J/DB/OL]. 全球变化数据仓储电子杂志, 2022. <https://doi.org/10.3974/geodb.2022.08.01.V1>. <https://cstr.escience.org.cn/CSTR:20146.11.2022.08.01.V1>.

来一系列复杂和严重的后果,如:多年冻土变为季节性冻土增加了土壤中有有机碳和甲烷的排放,进一步促进全球气候增温<sup>[5]</sup>;冻土性质的变化改变了本地和周边地区地表和地下的理化性质,给基础设施和工程项目带来严重的安全隐患<sup>[6]</sup>;受冻土影响的土壤变暖对北极生态系统产生直接影响<sup>[6]</sup>等。因此,评估当前和未来多年冻土空间分布和动态变化对全球碳循环模拟、气候变化预测以及工程风险评估至关重要<sup>[2]</sup>。

目前,一些研究使用经验公式或数学物理方法对冻土的未来分布及活动层厚度进行了估算<sup>[2,7-9]</sup>,然而多数研究未发布相应的数据集,一定程度上延缓了后续研究的跟进。在选用数据和方法方面:还没有研究将最新的国际耦合模式比较计划第六阶段(CMIP6)模式模拟结果作为气候输入研发北半球的多年冻土未来动态变化数据,而模式中具有的气温和雪盖厚度已经被证明是影响冻土模型最重要的因素<sup>[10]</sup>;同时,以往的研究对象大部分以十余年或数十年为时间单位,时间分辨率不能满足较短研究期的研究需要,此外,研究人员也无法根据自己的研究时期获得对应时期多年冻土的平均状态或序列;一些研究范围为青藏高原等典型区域,无法满足半球性的大范围研究需求。半经验半理论的 Kudryavtsev 方法已经被证明在不同气候条件下计算冻土活动层具有较好的效果且被广泛应用<sup>[10-13]</sup>,适合用以在北半球进行大范围应用。

基于此,本研究应用 Kudryavtsev 方法,在先前研究的经验参数设置基础上,使用了最新的 CMIP6 中两个模式数据(CMCC-CM2-SR5<sup>[14]</sup>和 CMCC-ESM2<sup>[15]</sup>)的模拟结果和 SoilGrids 2.0<sup>[16]</sup>土壤数据,计算了北半球多年冻土顶板温度 and 活动层厚度以年为时间单位的时间序列,并补充计算了多年冻土面积。该数据集填补了未来不同情境下年尺度冻土分布数据的空缺,为冻土退化、气候变化、北极生态等相关研究提供了数据支持。

## 2 数据集元数据简介

《北半球冻土顶板温度与活动层厚度 0.625°×0.4712°栅格数据集(2015–2100)》<sup>[17]</sup>的名称、作者、地理区域、数据年代、时间分辨率、空间分辨率、数据集组成、数据出版与共享服务平台、数据共享政策等信息见表1。

## 3 数据研发方法

### 3.1 数据来源

CMIP6 是 CMIP 计划实施 20 多年来参与的模式数量最多、设计的科学试验最完善、提供的模拟数据最庞大的一次<sup>[19]</sup>。CMIP6 采用共享社会经济路径(SSPs,表示未来经济社会系统的不同发展模式)和典型浓度路径(RCPs,表示 21 世纪末的目标辐射强迫值)的组合矩阵构成未来的不同情景,其中 SSP126 情景为 SSP1(可持续路径)与 RCP2.6 情景的组合,SSP245 情景为 SSP2(中间路径)与 RCP4.5 情景的组合,SSP370 情景为 SSP3(区域竞争路径)与 RCP7.0 情景的组合,SSP585 为 SSP5(化石燃料为主发展路径)与 RCP8.5 情景的组合。本研究根据时间分辨率、空间分辨率和实验驱动条件等选择了 CMCC-CM2-SR5<sup>[14]</sup>与 CMCC-ESM2<sup>[15]</sup>两个模式在 SSP126、SSP245、SSP370 和 SSP585 四

表 1 《北半球冻土顶板温度与活动层厚度 0.625°×0.4712°栅格数据集（2015–2100）》元数据简表

条 目	描 述
数据集名称	北半球冻土顶板温度与活动层厚度 0.625°×0.4712°栅格数据集（2015–2100）
数据集短名	NH_Permafrost_2015-2100
作者信息	吴潇然，中国科学院地理科学与资源研究所，wu_xiaoran@outlook.com 赵娜，中国科学院地理科学与资源研究所，zhaon@lreis.ac.cn
地理区域	北半球
数据年代	2015–2100
时间分辨率	年
空间分辨率	0.625°×0.4712°
数据格式	.tif、.xls
数据量	35.6 MB
数据集组成	（1）冻土顶板温度数据；（2）活动层厚度数据；（3）冻土面积数据
基金项目	中国科学院（XDA20030203）
数据计算环境	Microsoft 365；ArcGIS；R
出版与共享服务平台	全球变化科学研究数据出版系统 <a href="http://www.geodoi.ac.cn">http://www.geodoi.ac.cn</a>
地址	北京市朝阳区大屯路甲 11 号 100101，中国科学院地理科学与资源研究所
数据共享政策	全球变化科学研究数据出版系统的“数据”包括元数据（中英文）、通过《全球变化数据仓储电子杂志（中英文）》发表的实体数据集和通过《全球变化数据学报（中英文）》发表的数据论文。其共享政策如下：（1）“数据”以最便利的方式通过互联网系统免费向全社会开放，用户免费浏览、免费下载；（2）最终用户使用“数据”需要按照引用格式在参考文献或适当的位置标注数据来源；（3）增值服务用户或以任何形式散发和传播（包括通过计算机服务器）“数据”的用户需要与《全球变化数据学报（中英文）》编辑部签署书面协议，获得许可；（4）摘取“数据”中的部分记录创作新数据的作者需要遵循 10% 引用原则，即从本数据集中摘取的数据记录少于新数据集总记录量的 10%，同时需要对摘取的数据记录标注数据来源 <sup>[18]</sup>
数据和论文检索系统	DOI，CSTR，Crossref，DCI，CSCD，CNKI，SciEngine，WDS/ISC，GEOSS

种典型情景下的近地表空气温度（tas）、积雪厚度（snd）和土壤水分（mrso）三个变量，时间跨度为 2015–2100 年，空间分辨率为全球 288×192 个像元，取两个模式的平均值作为模型输入参数。

SoilGrids 2.0 数据<sup>[16]</sup>使用机器学习方法绘制了土壤属性的全球空间分布，其空间分辨率为 250 m，包含六个土壤分层数据（0–5 cm、5–15 cm、15–30 cm、30–60 cm、60–100 cm 和 100–200 cm）。本研究选择了其中的黏土含量、砂砾含量、粉粒含量、土壤有机碳含量和土壤容重五个参数，使用加权平均法将六个分层土壤平均为一个土壤柱，并将其重采样至 0.625°×0.4712°。由于对未来的土壤属性还难以预测，因此研究假设土壤属性在研究期内不发生变化，这在其他同类研究中均被认可。

3.2 模型原理

Kudryavtsev 方法是一种已被广泛使用和验证的半经验型方法，它综合考虑了积雪、植被、土壤水分含量、土壤热性质等因素对活动层的影响，把复杂的大气——冻土系统划分为单独的分量，逐个考虑各层的热情况<sup>[20]</sup>。其主要计算方法如下<sup>[1,2,8,10,21]</sup>：

假设气温的年变化可以近似为余弦函数，则气温  $T(t)$  可表示为：

$$T(t) = T_a + A_a \cdot \cos(2\pi \cdot t / P) \quad (1)$$

式中,  $T_a$  和  $A_a$  分别为年平均气温及其振幅,  $t$  为时间,  $P$  为气温变动周期 (1 年)。

地温可认为是气温经过积雪层和植被层影响作用后的结果, 因此年平均地温 ( $T_s$ ) 和年平均地温振幅 ( $A_s$ ) 可表示为:

$$T_s = T_a + \Delta T_{sn} + \Delta T_{veg} \quad (2)$$

$$A_s = A_a - \Delta A_{sn} - \Delta A_{veg} \quad (3)$$

式中,  $\Delta T_{sn}$  和  $\Delta A_{sn}$  分别为积雪层对年平均气温及其振幅的影响,  $\Delta T_{veg}$  和  $\Delta A_{veg}$  分别为植被层对年平均气温及其振幅的影响, 这四个参数可通过以下公式计算:

$$\Delta T_{sn} = \Delta A_{sn} = A_a \cdot \left\{ 1 - \exp \left[ -Z_{sn} \cdot \left( \frac{\pi}{P \cdot K_{sn}} \right)^{1/2} \right] \right\} \quad (4)$$

$$\Delta T_{veg} = \frac{\Delta A_1 \cdot \tau_1 - \Delta A_2 \cdot \tau_2}{P} \cdot \frac{\pi}{2} \quad (5)$$

$$\Delta A_{veg} = \frac{\Delta A_1 \cdot \tau_1 + \Delta A_2 \cdot \tau_2}{P} \quad (6)$$

$$\Delta A_1 = (A_{veg} - T_{veg}) \cdot \left\{ 1 - \exp \left[ -Z_{veg}^f \cdot \left( \frac{\pi}{K_{veg}^f \cdot 2\tau_1} \right)^{1/2} \right] \right\} \quad (7)$$

$$\Delta A_2 = (A_{veg} + T_{veg}) \cdot \left\{ 1 - \exp \left[ -Z_{veg}^t \cdot \left( \frac{\pi}{K_{veg}^t \cdot 2\tau_2} \right)^{1/2} \right] \right\} \quad (8)$$

$$A_{veg} = A_a - \Delta A_{sn} \quad (9)$$

$$T_{veg} = T_a + \Delta T_{sn} \quad (10)$$

式中,  $Z_{sn}$  和  $K_{sn}$  分别为积雪的厚度和热扩散系数,  $\tau_1$  和  $\tau_2$  分别为冷期和暖期的持续时间,  $Z_{veg}^f$  和  $K_{veg}^f$  分别为植被层在解冻/冻结状态的厚度和热扩散系数。

最后土壤中季节性融化或冻结深度处的年均温度 ( $T_z$ ), 即冻土顶板温度可以表示为:

$$T_{numerator} = 0.5T_s \cdot (\lambda_f + \lambda_t) + A_s \cdot \frac{\lambda_t - \lambda_f}{\pi} \cdot \left[ \frac{T_s}{A_s} \cdot \arcsin \left( \frac{T_s}{A_s} \right) + \left( 1 - \frac{T_s^2}{A_s^2} \right)^{1/2} \right] \quad (12)$$

$$T_z = \frac{T_{numerator}}{\lambda^*}, \text{ 其中 } \lambda^* = \begin{cases} \lambda_f, & \text{若 } T_{numerator} < 0 \\ \lambda_t, & \text{若 } T_{numerator} > 0 \end{cases} \quad (13)$$

式中,  $\lambda_{tf}$  为解冻/冻结状态的土壤导热系数。

活动层厚度 ( $Z$ ) 的计算公式为:

$$Z = \frac{2(A_s - T_z) \cdot \left( \frac{\lambda \cdot P \cdot C}{\pi} \right)^{1/2} + \frac{(2A_z \cdot C \cdot Z_c + Q_{ph} \cdot Z_c) \cdot Q_{ph} \cdot \left( \frac{\lambda \cdot P}{\pi \cdot C} \right)^{1/2}}{2A_z \cdot C \cdot Z_c + Q_{ph} \cdot Z_c + (2A_z \cdot C + Q_{ph}) \cdot \left( \frac{\lambda \cdot P}{\pi \cdot C} \right)^{1/2}}}{2A_z \cdot C + Q_{ph}} \quad (14)$$

$$A_z = \frac{A_s - T_z}{\ln \left( \frac{A_s + Q_{ph} / 2C}{|T_z| + Q_{ph} / 2C} \right)} - \frac{Q_{ph}}{2C} \quad (15)$$

$$Z_c = \frac{2(A_s - T_z) \cdot \sqrt{\frac{\lambda_t \cdot P \cdot C}{\pi}}}{2A_z \cdot C + Q_{ph}} \quad (16)$$

$$\lambda, C = \begin{cases} \lambda_f, C_f, & \text{若 } T_z < 0 \\ \lambda_t, C_t, & \text{若 } T_z > 0 \end{cases} \quad (17)$$

式中,  $C_{uf}$  为解冻/冻结状态的土壤体积热容量,  $Q_{ph}$  为相变体积潜热。

## 4 数据结果

### 4.1 数据集组成

ActiveLayerThickness 文件夹下为多年冻土区活动层厚度数据, 单位为 m, 共 344 个文件; Temperature 文件夹下为冻土顶板年均温度数据, 单位为 °C, 共 344 个文件; “NH\_PermafrostArea.xls” 为多年冻土面积时间序列数据, 单位为 km<sup>2</sup>; “ReadMe.txt” 为数据使用说明文件。

### 4.2 数据结果

如图 1 所示, 目前北半球的多年冻土主要分布于欧亚大陆东北部中高纬地区、美洲大陆北部高纬地区与青藏高原地区三个地区, 面积依次减小。前两者的冻土活动层厚度整体上自南向北减小, 青藏高原地区冻土活动层最薄处位于其西部地区和中北部地区。

2015–2050 年间, 四个情景下冻土消失区域的分布较为相似, 主要为欧亚大陆冻土区西南部与美洲大陆冻土区南部, 青藏高原西北部地区冻土小面积减少, 而冻土活动层厚度变化随纬度升高而增加。

2050–2100 年, 冻土退化在不同情景间的差异非常显著。SSP126 情景下, 冻土消失面积相对较少, 冻土活动层厚度出现小幅增加, 主要发生在美洲大陆冻土区北部与欧亚大陆冻土区东部; SSP245 情景下, 美洲大陆与欧亚大陆冻土区南部多年冻土明显减少, 其中美洲大陆冻土区最北端冻土活动层厚度增加最为明显; SSP370 情景下北半球多年冻土面积大幅减小, 美洲大陆北部冻土接近消失, 欧亚大陆冻土区和青藏高原地区多年冻土退化严重; SSP585 情景下北半球冻土面积接近消失, 剩余的多年冻土活动层厚度增加显著, 青藏高原地区冻土严重退化。

如图 2 所示, 2015 年北半球多年冻土面积约为  $20.99 \times 10^6$  km<sup>2</sup> (以中间路径 SSP2 和中等排放情景 RCP4.5 结合的 SSP245 情景估计)。在 SSP126、SSP245、SSP370 和 SSP585 四个情景下北半球冻土面积均呈现波动减少趋势。四个情景所模拟的世纪末冻土面积分别为  $10.62 \times 10^6$  km<sup>2</sup>、 $8.48 \times 10^6$  km<sup>2</sup>、 $3.13 \times 10^6$  km<sup>2</sup> 和  $1.34 \times 10^6$  km<sup>2</sup>, 与 2015 年相比, 分别减少了 49.37%、59.60%、85.09% 和 93.63%。

### 4.3 数据验证

CMIP6 的模式输出提供了 2015–2100 年不同情景的模拟结果, 因此没有对应的地面观测可以作为准确的验证数据。通常, 时间序列预测模型通过验证历史记录以评估模型精度。

关于 Kudryavtsev 方法已经有大量研究在不同地区进行了验证工作<sup>[1, 10-13, 20-22]</sup>, 并认为该模型能够相对较好地模拟多年冻土分布与活动层厚度; 本研究的模型输入数据中, CMIP6 的模式输出是当前预测未来不同情景下环境变量最权威和最具应用价值的数据来源<sup>[19]</sup>, 同时, SoilGrids 2.0 是被广泛应用的高精度土壤数据集<sup>[16]</sup>。

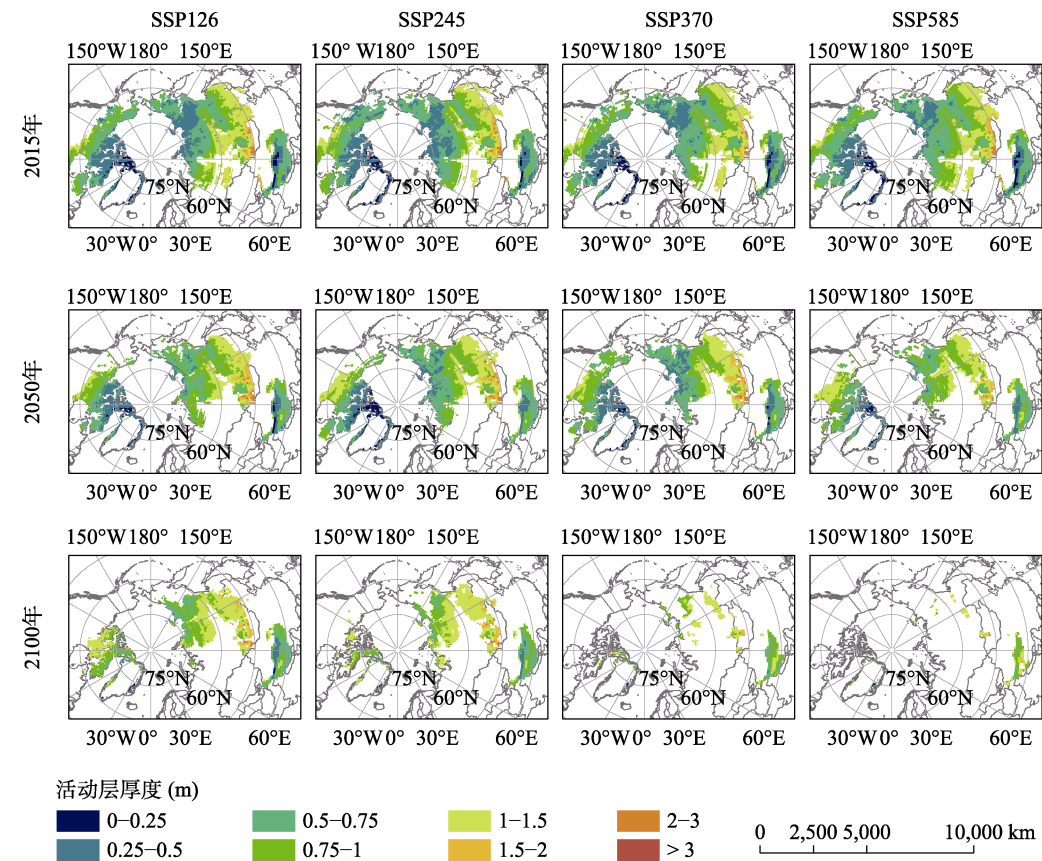


图 1 2015、2050、2100 年不同情境下北半球多年冻土区活动层厚度

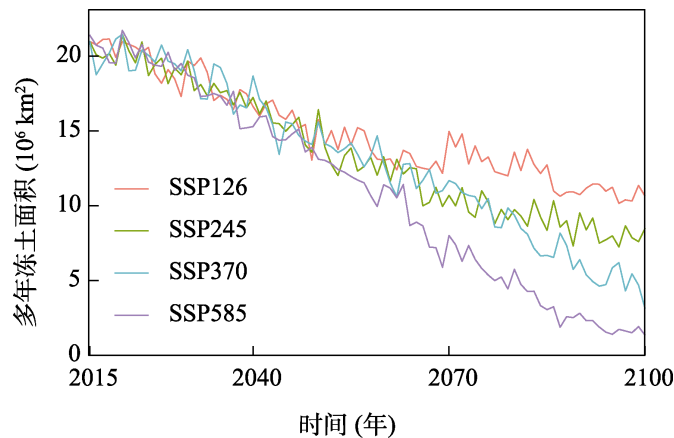


图 2 不同情境下北半球多年冻土面积变化时间序列 (2015-2100)

与相关研究进行横向对比, 本研究估计的 2015 年北半球多年冻土面积约为  $20.99 \times 10^6 \text{ km}^2$ , 相关研究对北半球多年冻土面积的估计分别为  $21.64 \times 10^6 \text{ km}^2$  (2014–2018 年)<sup>[2]</sup>,  $22.79 \times 10^6 \text{ km}^2$  (1920s–1990s)<sup>[23]</sup> 和  $19.96 \times 10^6 \text{ km}^2$  (2000–2015 年, 未考虑植被因素)<sup>[24]</sup>, 因此本研究对北半球多年冻土面积的估计是较为合理的。

## 5 讨论和总结

Kudryavtsev 等基于热传导方程的冻土模型的有效性在历史记录中已经得到了良好的验证, 但在进行预测时由于缺乏未来不同情景下动态的植被属性、土壤质地等模型输入, 这些参数在模型中常常被设定为定值, 在一定程度上影响了模型准确性。此外, 气温和雪盖厚度是冻土模型中最关键的因素, 但 CMIP6 模式输出的分辨率较低, 因此所生产的数据集的分辨率粗糙, 应用于空间异质性较大的局地研究仍有较大困难和不确定性。

多年冻土面积萎缩和活动层厚度增加将导致严重的气候反馈、生态问题和工程风险等, 而全球气候变化的加速已经加剧了多年冻土的退化, 两者的交互影响可能为未来气候、生态等环境带来更加复杂和难以预测的变化。及时预测多年冻土的未来发展变化有助于理解多年冻土对全球气候变化的响应, 以及对可能发生的生态问题、工程问题做好相应防范。鉴于当前对北半球多年冻土未来情境下的预测数据缺乏, 本研究使用在历史记录中表现良好的 Kudryavtsev 方法, 以 CMIP6 多模式输出和 SoilGrids 数据集作为输入, 研发了长达 86 年的 SSP126、SSP245、SSP370 和 SSP585 四种不同情景下的北半球冻土顶板温度、冻土面积以及活动层厚度时间序列, 可用于研究未来多年冻土的空间分布特征、面积变化和活动层厚度, 该数据集为冻土退化、气候变化、北极生态等相关研究提供了数据支持。

**作者分工:** 赵娜对数据集的开发做了总体设计并修订了数据论文; 吴潇然采集和处理了土壤、气候等模型输入数据和撰写了数据论文; 叶延磊优化了模型算法和修订了数据论文。

**利益冲突声明:** 本研究不存在研究者以及与公开研究成果有关的利益冲突。

## 参考文献

- [1] Shiklomanov, N. I., Nelson, F. E. Analytic representation of the active layer thickness field, Kuparuk River Basin, Alaska [J]. *Ecological Modelling*, 1999, 123(2/3): 105–125.
- [2] Li, G. J., Zhang, M. Y., Pei, W. S., *et al.* Changes in permafrost extent and active layer thickness in the Northern Hemisphere from 1969 to 2018 [J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 804: 150182.
- [3] Zhang, T., Barry, R., Knowles, K., *et al.* Statistics and characteristics of permafrost and ground-ice distribution in the Northern Hemisphere [J]. *Polar Geography*, 2008, 31(1/2): 47–68.
- [4] Streletskiy, D. Permafrost degradation [C]. In: Haeberli, W., Whiteman, C. (eds). *Snow and Ice-Related Hazards, Risks, and Disasters* (Second Edition). Amsterdam: Elsevier, 2021: 297–322. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-817129-5.00021-4>.
- [5] Moon, T. A., Overeem, I., Druckenmiller, M., *et al.* The expanding footprint of rapid Arctic change [J]. *Earth's Future*, 2019, 7(3): 212–218.
- [6] Melvin, A. M., Larsen, P., Boehlert, B., *et al.* Climate change damages to Alaska public infrastructure and the economics of proactive adaptation [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2017, 114(2): E122–E131.

- [7] Wu, Q. B., Li, X., Li, W. J. The prediction of permafrost change along the Qinghai-Tibet Highway, China [J]. *Permafrost and Periglacial Processes*, 2000, 11(4): 371–376.
- [8] Liu, L., Zhao, D. S., Wei, J. Q., *et al.* Permafrost sensitivity to global warming of 1.5 °C and 2 °C in the Northern Hemisphere [J]. *Environmental Research Letters*, 2021, 16(3): 034038.
- [9] Zhao, S. M., Cheng, W. M., Yuan, Y. C., *et al.* Global permafrost simulation and prediction from 2010 to 2100 under different climate scenarios [J]. *Environmental Modelling & Software*, 2022, 149: 105307.
- [10] Wang, K., Jafarov, E., Overeem, I. Sensitivity evaluation of the Kudryavtsev permafrost model [J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 720: 137538.
- [11] Panda, S., Romanovsky, V., Marchenko, S. High-resolution permafrost modeling in the Arctic Network National Parks, Preserves and Monuments [R]. Colorado: National Park Service, 2016. <https://irma.nps.gov/DataStore/Reference/Profile/2237720>.
- [12] Streletskiy, D. A., Shiklomanov, N. I., Nelson, F. E. Spatial variability of permafrost active-layer thickness under contemporary and projected climate in Northern Alaska [J]. *Polar Geography*, 2012, 35(2): 95–116.
- [13] Sazonova, T. S., Romanovsky, V. E. A model for regional-scale estimation of temporal and spatial variability of active layer thickness and mean annual ground temperatures [J]. *Permafrost and Periglacial Processes*, 2003, 14(2): 125–39.
- [14] Lovato, T., Peano, D. CMCC CMCC-CM2-SR5 model output prepared for CMIP6 ScenarioMIP. Version 20200622 [DS]. Earth System Grid Federation, 2020. <https://doi.org/10.22033/ESGF/CMIP6.1365>.
- [15] Lovato, T., Peano, D., Butenschön, M. CMCC CMCC-ESM2 model output prepared for CMIP6 ScenarioMIP. Version 20210202 [DS]. Earth System Grid Federation, 2021. <https://doi.org/10.22033/ESGF/CMIP6.13168>.
- [16] Poggio, L., De Sousa, L. M., Batjes, N. H., *et al.* SoilGrids 2.0: producing soil information for the globe with quantified spatial uncertainty [J]. *Soil*, 2021, 7(1): 217–240.
- [17] 吴潇然, 赵娜. 北半球冻土顶板温度与活动层厚度  $0.625^{\circ} \times 0.4712^{\circ}$  栅格数据集(2015–2100)[J/DB/OL]. 全球变化数据仓储电子杂志, 2022. <https://doi.org/10.3974/geodb.2022.08.01.V1>. <https://cstr.escience.org.cn/CSTR:20146.11.2022.08.01.V1>.
- [18] 全球变化科学研究数据出版系统. 全球变化科学研究数据共享政策[OL]. <https://doi.org/10.3974/dp.policy.2014.05> (2017 年更新).
- [19] Eyring, V., Bony, S., Meehl, G. A., *et al.* Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) experimental design and organization [J]. *Geoscientific Model Development*, 2016, 9(5): 1937–1958.
- [20] 王澄海, 靳双龙, 吴忠元等. 估算冻结(融化)深度方法的比较及在中国地区的修正和应用[J]. 地球科学进展, 2009, 24(2): 132–140.
- [21] Anisimov, O. A., Shiklomanov, N. I., Nelson, F. E. Global warming and active-layer thickness: results from transient general circulation models [J]. *Global and Planetary Change*, 1997, 15(3/4): 61–77.
- [22] 王澄海, 靳双龙, 施红霞. 未来 50a 中国地区冻土面积分布变化[J]. 冰川冻土, 2014, 36(1): 1–8.
- [23] Zhang, T., Heginbottom, J. A., Barry, R. G., *et al.* Further statistics on the distribution of permafrost and ground ice in the Northern Hemisphere [J]. *Polar Geography*, 2000, 24(2): 126–131.
- [24] Shi, Y. Y., Niu, F. J., Lin, Z. J., *et al.* Freezing/thawing index variations over the circum-Arctic from 1901 to 2015 and the permafrost extent [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 660: 1294–1305.