

DOI:10.19951/j.cnki.1672-9331.20231229001

文章编号:1672-9331(2025)01-0015-13

引用格式:张志超,游志浪,许健,等.莫斯科—喀山高速铁路沿线大气冻融指数时空变化特征[J].长沙理工大学学报(自然科学版), 2025,22(1):15-27.

Citation: ZHANG Zhichao, YOU Zhilang, XU Jian, et al. Spatiotemporal variation characteristics of air freezing and thawing index along Moscow-Kazan High-Speed Railway[J]. J Changsha Univ Sci Tech (Nat Sci), 2025, 22(1): 15-27.

# 莫斯科—喀山高速铁路沿线大气冻融指数 时空变化特征

张志超<sup>1</sup>, 游志浪<sup>1,2</sup>, 许健<sup>1,2</sup>, 彭洋<sup>1</sup>, GAGARIN L<sup>3</sup>

(1. 西安建筑科技大学 土木工程学院, 陕西 西安 710055, 中国; 2. 西安建筑科技大学 陕西省岩土与地下空间工程重点实验室, 陕西 西安 710055, 中国; 3. 俄罗斯科学院 西伯利亚分院梅尔尼科夫冻土研究所, 西伯利亚 677010, 俄罗斯)

**摘要:**【目的】莫斯科—喀山高速铁路(简称“莫喀高铁”)是我国参与的高纬度地区重要代表性工程,因此有必要掌握沿线地区气温特征以助力该工程的设计与建设。【方法】基于英国东英吉利大学气候研究中心(Climatic Research Unit, CRU)的1901—2021年CRU格点数据月平均气温数据集,研究了莫喀高铁沿线地区的气温冻融指数变化趋势及空间变化特征。【结果】莫喀高铁沿线地区1901—2021年年冻结指数平均值为411.23~1 773.70 °C·d,总体呈波动下降趋势;年融化指数平均值为2 223.69~3 170.31 °C·d,总体呈波动上升趋势。这表明1901—2021年莫喀高铁沿线地区的年平均气温是逐渐升高的。在空间分布上,莫喀高铁沿线地区1901—2021年的多年平均冻结指数呈明显的由西向东递增的趋势,多年平均冻结指数为841.55~1 360.13 °C·d,而该地区多年平均融化指数整体相差不大,为2 654.40~2 748.63 °C·d,由中部向东西两侧递增。这表明:自下诺夫哥罗德到莫斯科地区,气温逐渐降低,而自下诺夫哥罗德到喀山地区,气温逐渐升高;莫喀高铁沿线地区气温自西向东逐渐升高,莫斯科地区升温相对不明显,而喀山是升温最明显的地区。【结论】采用CRU格点气温数据集来研究莫喀高铁沿线地区大气冻融指数时空变化特征是一种较为有效的手段,可为研究该高速铁路沿线地区的气候变化特征、冻土状态和其他工程建设提供科学借鉴。

**关键词:**莫喀高铁沿线地区;月平均气温;冻结指数;融化指数;时空变化特征;冻土变化

中图分类号:U212;P467

文献标志码:A

## Spatiotemporal variation characteristics of air freezing and thawing index along Moscow-Kazan High-Speed Railway

ZHANG Zhichao<sup>1</sup>, YOU Zhilang<sup>1,2</sup>, XU Jian<sup>1,2</sup>, PENG Yang<sup>1</sup>, GAGARIN L<sup>3</sup>

(1. College of Civil Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China; 2. Shaanxi Key Laboratory of Geotechnical and Underground Space Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China; 3. Melnikov Permafrost Institute, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, Siberian 677010, Russia)

**Abstract:** [Purposes] The Moscow-Kazan High-Speed Railway is a key representative project at high latitude regions in which Chinese enterprises have participated. Therefore, it is necessary to

收稿日期:2023-12-29;修回日期:2024-02-15;接受日期:2024-02-18

基金项目:陕西高校青年创新团队(2023-2026);陕西省自然科学基金(2024JC-YBQN-0497);陕西省博士后基金(2023BSHEDZZ271);西安建筑科技大学人才引进科研启动经费(1960323022)

通信作者:游志浪(1994—)(ORCID:0000-0002-9163-3158),男,讲师,主要从事高寒区冻土路基灾害机理及防治方面的研究。E-mail:zlyou@xauat.edu.cn

understand the air temperature characteristics along the route to help the design and construction of this project. [Methods] Based on the monthly average air temperature dataset of CRU grid data from the Climate Research Unit (CRU) of the University of East Anglia (UEA) between 1901 and 2021, the variation trend and spatial variation characteristics of air temperature freezing and thawing index along Moscow-Kazan High-Speed Railway were studied. [Findings] In the Moscow-Kazan High-Speed Railway region, the average annual freezing index from 1901 to 2021 fluctuates between  $411.23\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}$  and  $1\ 773.70\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}$  and shows an overall decreasing trend. Simultaneously, the average annual thawing index during the same period fluctuates between  $2\ 223.69\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}$  and  $3\ 170.31\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}$  and exhibits an overall increasing trend. This indicates that the annual average air temperature along the Moscow-Kazan High-Speed Railway has been gradually increasing from 1901 to 2021. In terms of spatial distribution, the multi-year average freezing index in the Moscow-Kazan High-Speed Railway region demonstrates a clear increasing trend from west to east between 1901 and 2021. The multi-year average freezing index ranges from  $841.55\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}$  to  $1\ 360.13\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}$ . The multi-year average thawing index in the region shows relatively little variation overall, ranging from  $2\ 654.40\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}$  to  $2\ 748.63\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}$ , increasing slightly from the central region towards both the eastern and western sides. This suggests that from Nizhny Novgorod to Moscow, the air temperature gradually decreases, while from Nizhny Novgorod to Kazan, the air temperature gradually increases. The air temperature along the Moscow-Kazan High-Speed Railway is gradually rising from west to east. The warming trend is relatively less pronounced in the Moscow region, whereas the Kazan region stands out as the area with the most noticeable air temperature increase along this route. [Conclusions] Utilizing the air temperature dataset of CRU grid data to study the spatiotemporal variation characteristics of the air freezing and thawing index along the Moscow-Kazan High-Speed Railway is an effective means. It provides a scientific reference for researching climate change patterns, frozen soil conditions, and other engineering constructions along this route.

**Key words:** Moscow-Kazan High-Speed Railway region; monthly average air temperature; freezing index; thawing index; spatiotemporal variation characteristics; frozen soil variation

**Foundation items:** Project (2023-2026) supported by The Youth Innovation Team of Shaanxi Universities; Project (2024JC-YBQN-0497) supported by Natural Science Basic Research Program of Shaanxi; Project (2023BSHEDZZ271) supported by Shaanxi Postdoctoral Fund; Project (1960323022) supported by Research Starting Funds for Imported Talents from Xi'an University of Architecture and Technology

**Corresponding author:** YOU Zhilang (1994—)(ORCID: 0000-0002-9163-3158), male, lecturer, research interest: mechanisms and control measures of the frozen subgrade in the high-cold regions.

E-mail: zlyou@xauat.edu.cn

## 0 引言

莫斯科—喀山高速铁路(简称“莫喀高铁”)沿线地区地处中高纬度寒冷地区,具有典型的温带大陆性气候特征,且其冬季漫长寒冷,降雪量大,季节性冻土分布广泛<sup>[1]</sup>。莫喀高铁沿线路基不可

避免会遭受冻胀<sup>[2-6]</sup>、融沉等灾害<sup>[7-12]</sup>。目前,随着共建“冰上丝绸之路”的倡议持续深入推进,我国企业将深度参与高纬度地区基础设施建设。

莫喀高铁是我国企业参与的代表性重大基础工程,计划建成16个车站,全程为 $770\text{ km}$ <sup>[4-6]</sup>。其干线西起莫斯科,中间穿过弗拉基米尔、下诺夫哥罗德和切博克萨雷等重要城市,向东延伸至喀山,

如图1所示<sup>[5]</sup>。季节性冻土在莫喀高铁沿线地区广泛分布,不可避免会对工程的建设造成影响。冻土是0℃以下,并含有冰的各种岩石和土壤,作为寒冷气候的产物,对气候变化非常敏感<sup>[10]</sup>。冻土变化对地表水热平衡、高寒生态系统及基础设施工程稳定性具有重要影响<sup>[13]</sup>。冻融指数是研究

冻土的重要参数之一,是寒冷(温暖)季节持续时间和温度的一种度量,可以衡量地气间的热量状况,在一定程度上表征某地区冻融作用的深度和强度。因此,冻融指数是判断冻土存在状态和长期变化的重要指标之一<sup>[14-18]</sup>,对冻土地区的工程设计、建设和运维具有重要参考价值。

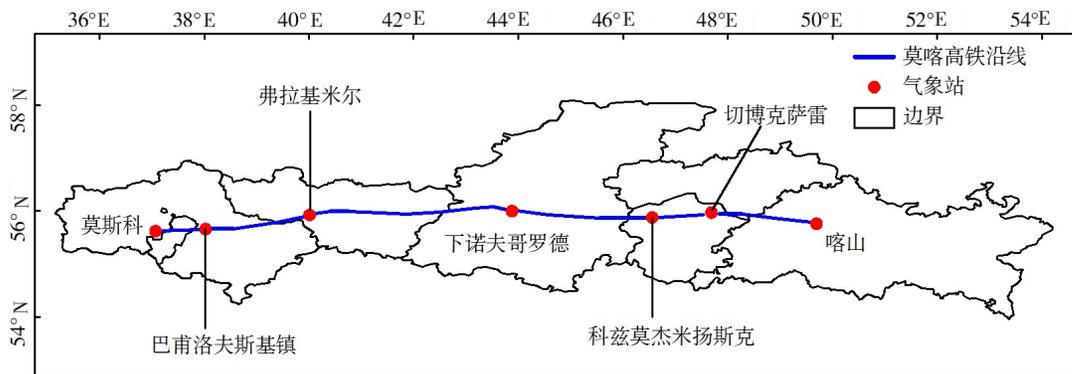


图1 莫喀高铁路线<sup>[5]</sup>

Fig. 1 Route of Moscow-Kazan High-Speed Railway<sup>[5]</sup>

目前,国内外针对冻土地区冻融指数的研究较为丰富,其中大多数是基于国家气象站等观测资料进行的,如以下典型研究:FRAUENFELD等<sup>[19]</sup>研究发现,俄罗斯多年冻土区的冻结/融化指数没有明显的变化,北美地区的冻结指数呈下降趋势,北极海岸地区与加拿大东部地区的融化指数呈明显的升高趋势;LUO等<sup>[20]</sup>基于中国东北21个选定站点的每日地表和气温,指出在过去40多年气候明显变暖背景下,冻结指数变小,而融化指数明显增大;WU等<sup>[21]</sup>指出青藏高原地区多年冻土区融化指数增加速率小于季节性冻土区的,而冻结指数减少速率高于季节性冻土地区的;PENG等<sup>[22]</sup>研究了北半球历史空气冻融指数的空间分布,并对三种气候情景下的空气冻融指数进行了预测;SHI等<sup>[23]</sup>基于空气温度逐日、逐月的数据集发现,环北极地区1901—2015年冻结指数呈下降趋势,而融化指数呈上升趋势;刘磊等<sup>[24]</sup>利用雅鲁藏布江流域中下游11个气象站点的逐日气温、地面温度数据计算了1977—2017年大气及地面冻融指数,分析了冻融指数时空变化趋势;陈聪等<sup>[25]</sup>基于1973—2021年覆盖全球陆地且超过14 000个站点的逐日气温观测数据,计算大气冻融指数并分析其时空变化特征,探讨其与地理因子的关系。

为了助力莫喀高铁的高质量建设,十分有必

要对莫喀高铁沿线地区的气温冻融指数时空变化特征进行研究。鉴于沿线地区气象资料较为缺乏,数据时间短,本文基于英国东英吉利大学气候研究中心的逐月气温数据库,研究了莫喀高铁沿线地区1901—2021年气温冻融指数变化趋势及空间变化特征。研究结果可较好反映沿线地区气候变化特征,为研究莫喀高铁沿线地区冻土变化和建设提供科学依据。

## 1 数据与方法

### 1.1 资料来源

本研究对莫喀高铁沿线气温冻融指数时空变化进行研究。由于莫喀高铁沿线地区气象站数量较少且分布不均匀,本研究选取英国东英吉利大学气候研究中心CRU TS 4.06(以下简称“CRU”)数据库中的72个格点的逐月气温资料。该资料的时间段为1901年1月—2021年12月,其中CRU逐月气温的空间分辨率为 $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$ <sup>[26]</sup>。

本研究基于莫喀高铁沿线地区典型气象站月平均气温数据([https://rp5.ru/Weather\\_in\\_the\\_world](https://rp5.ru/Weather_in_the_world)),对CRU格点数据在莫喀高铁沿线地区气象站的适用性进行评估。采用的气象站点有莫斯

科、巴甫洛夫斯基、弗拉基米尔、下诺夫哥罗德、科兹莫杰米扬斯克、切博克萨雷和喀山,数据时间为2012年10月—2021年12月。对于气象站缺测的数据采用以下方法插补:对于缺测1 d的数据,选择其前后各一天数值的平均值插补;对于缺测2 d的数据,缺测第一天选择该日期前两天数值取平均,缺测第二天选择该日期后两天的数值取平均;对于缺测3 d的数据,按缺测两天求出前后两天的数据,然后再取后者平均值为中间天数的缺测值;对于缺测超过4 d(包括4 d)及以上的数据,取前一年同一时间的数值<sup>[24,27]</sup>。

表1给出了莫喀高铁沿线地区气象站与其对应CRU格点的情况。从表1可以看出:莫喀高铁沿线地区气象站与CRU格点的海拔差异较小;喀山气象站和相应CRU格点的海拔相差最大,为56 m;巴甫洛夫斯基气象站和相应CRU格点的海拔相差最小,为4 m。这从侧面反映了海拔差异对CRU格点数据适用性评价的影响很小。

表1 莫喀高铁沿线地区气象站与CRU格点对应情况

Table 1 Correspondence of weather stations and CRU grids along Moscow-Kazan High-Speed Railway

站点名称	站点经纬度	站点海拔/m	CRU格点编号	CRU格点经纬度	CRU格点海拔/m
莫斯科	55.83°E 37.62°N	156	1号	55.75°E 37.75°N	143
巴甫洛夫斯基	55.77°E 38.68°N	135	2号	55.75°E 38.75°N	139
弗拉基米尔	56.12°E 40.35°N	172	3号	56.75°E 40.25°N	159
下诺夫哥罗德	56.32°E 44.00°N	148	4号	56.25°E 44.25°N	139
科兹莫杰米扬斯克	56.33°E 46.58°N	114	5号	56.25°E 46.75°N	127
切博克萨雷	56.09°E 47.35°N	165	6号	56.75°E 47.25°N	181
喀山	55.60°E 49.28°N	114	7号	55.75°E 49.25°N	58

## 1.2 研究方法

### 1.2.1 冻融指数计算

大气冻结/融化指数(简称“冻融指数”)为某个时段内日平均气温低于/高于0 °C的持续时间和其数值乘积的总和。本文研究采用逐月气温数据来计算冻融指数,如式(1)所示<sup>[28]</sup>。

$$\begin{aligned} F_i &= \sum_{i=1}^{M_f} |\bar{T}_i| \cdot D_i, \quad \bar{T}_i < 0 \text{ } ^\circ\text{C} \\ T_i &= \sum_{i=1}^{M_T} |\bar{T}_i| \cdot D_i, \quad \bar{T}_i \geq 0 \text{ } ^\circ\text{C} \end{aligned} \quad (1)$$

式中: $F_i$ 为大气冻结指数, $^\circ\text{C}\cdot\text{d}$ ;  $T_i$ 为大气融化指数, $^\circ\text{C}\cdot\text{d}$ ;  $\bar{T}_i$ 为第*i*月的月平均气温, $^\circ\text{C}$ ;  $D_i$ 为第*i*月天数;  $M_f$ 为一年中气温低于0 °C的月份数;  $M_T$ 为一年中气温高于或等于0 °C的月份数。

本研究基于气象站相对应CRU格点1901年1月—2021年12月的逐月气温数据,计算对应气象站每一年年冻融指数,确定莫喀高铁沿线地区冻融指数随时间变化情况;同时,建立各格点冻融指数平均值与地理信息的多元统计关系,利用空间插值方法得到了沿线地区空间分布特征。

### 1.2.2 CRU数据评价方法

莫喀高铁沿线地区CRU格点与气象站数据的月气温差值被用来衡量CRU格点与气象站数据的接近程度。协方差、相关系数、均方根误差及平均绝对误差被用于分析CRU格点数据与气象站数据的相关性,相关公式如下:

$$C_{OV}(X, Y) = E(X - E_X)(Y - E_Y) \quad (2)$$

$$\rho_{XY} = C_{OV}(X, Y) / \sqrt{D_X D_Y} \quad (3)$$

$$R_{MSE} = \sqrt{\sum_{i=1}^n (X_i - Y_i)^2 / n} \quad (4)$$

$$M_{AE} = \sum_{i=1}^n |X_i - Y_i| / n \quad (5)$$

式中: $X, Y$ 分别为莫喀高铁气象站和CRU的数据;  $E$ 为数学期望;  $E_X, E_Y$ 分别为 $X, Y$ 的数学期望值;  $C_{OV}(X, Y)$ 为协方差;  $\rho_{XY}$ 为相关系数;  $D_X, D_Y$ 分别为两个变量 $X, Y$ 的方差;  $R_{MSE}$ 为均方根误差;  $X_i$ 为气象站点数据;  $Y_i$ 为CRU格点数据;  $n$ 为样品数量;  $i=1, 2, 3, \dots, n$ ;  $M_{AE}$ 为平均绝对误差。

## 2 结果与分析

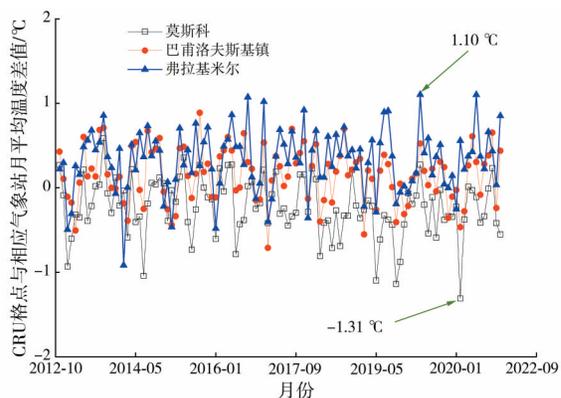
### 2.1 CRU格点数据适用性评价

#### 2.1.1 CRU格点与沿线地区气象站点月平均温差值

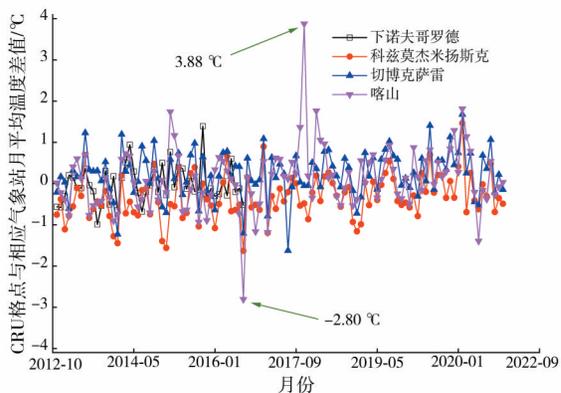
图2给出了莫喀高铁沿线地区气象站与CRU格点数据月平均温差值。从图2(a)可知,对于莫喀高铁沿线地区西部三地区,其CRU格点数据与

气象站点的月平均温差值较小,为-1.31~1.10 °C,具体为:① 莫斯科地区的 CRU 格点与气象站数据的月平均温度差为-1.31~0.59 °C,其最大差值出现在 2013 年 9 月,最小值出现在 2021 年 2 月,温差绝对值的平均值为 0.32 °C;② 巴甫洛夫斯基地区的 CRU 格点与气象站数据的月平均温度差为-0.71~0.89 °C,其最大差值出现在 2015 年 9 月,最小值出现在 2017 年 2 月,温差绝对值的平均值为 0.30 °C;③ 弗拉基米尔地区的 CRU 格点与弗拉基米尔气象站数据的月平均温度差为-0.92~1.10 °C,其最大差值出现在 2020 年 4 月和 2021 年 6 月,最小差值出现在 2014 年 2 月,温差绝对值的平均值为 0.42 °C。

由图 2(b)可知,对于莫喀高铁沿线地区东部四地区,其 CRU 数据格点与气象站点的气温差值为-2.80~3.88 °C,范围较小。具体为:① 下诺夫哥罗德地区的 CRU 格点与气象站数据的月平均温度差为-1.24~1.40 °C,其最大差值出现在 2021 年 4 月,



(a) 莫喀高铁沿线地区西部三地区



(b) 莫喀高铁沿线地区东部四地区

图 2 莫喀高铁沿线地区气象站与 CRU 格点数据月平均温差值  
Fig. 2 Monthly average air temperature differences between weather station and CRU grid data along Moscow-Kazan High-Speed Railway

最小值出现在 2016 年 1 月,温差绝对值的平均值为 0.37 °C;② 科兹莫杰米扬斯克地区的 CRU 格点与气象站数据的月平均温度差为-1.63~1.47 °C,其最大差值出现在 2021 年 2 月,最小差值出现在 2016 年 8 月,温差绝对值的平均值为 0.51 °C;③ 切博克萨雷地区的 CRU 格点与气象站数据的月平均温度差为-1.62~1.68 °C,其最大差值出现在 2021 年 2 月,最小差值出现在 2017 年 7 月,温差绝对值的平均值为 0.48 °C;④ 喀山地区的 CRU 格点与气象站数据的月平均温度差为-2.80~3.88 °C,其最大差值出现在 2017 年 11 月,最小差值出现在 2016 年 8 月,温差绝对值的平均值为 0.56 °C。

2012 年 10 月—2021 年 12 月 CRU 格点与气象站点的月平均温度数据相关性如图 3 所示。由图 3 可知,CRU 格点数据与对应气象站的逐月气温数据都密集分布于  $y = 1.023x + 0.0098$  附近,有较强的正相关性。综上所述,气象站和 CRU 格点数据的月平均温度比较接近,为后续以 CRU 格点数据替代气象站数据来开展莫喀高铁沿线地区大气冻融指数时空变化特征研究提供了科学依据。

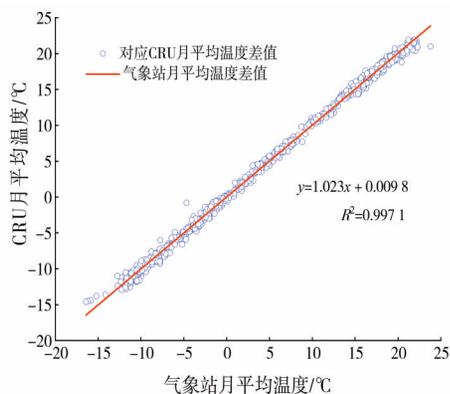


图 3 2012 年 10 月—2021 年 12 月 CRU 格点与气象站数据相关性分析

Fig. 3 Correlation analysis of CRU grid and weather station data from October 2012 to December 2021

### 2.1.2 CRU 格点数据统计参数

表 2 给出了莫喀高铁沿线地区气象站与相应 CRU 格点数据的协方差。由表 2 可知,在莫喀高铁沿线不同地区,其数据的协方差值都比较大(86.24~125.33),并且从西至东逐渐增大。总体而言,CRU 数据在沿线地区的适用性较好,在莫喀高铁东部地区的适用性更好。

图 4 给出了莫喀高铁沿线地区对应 CRU 格点

数据的相关系数、均方根误差和平均绝对误差。由图4可知:①相关系数都在1附近;②均方根误差和平均绝对误差都小于1,为0.30~0.78。

以莫斯科气象站与对应的CRU格点数据为例,其协方差为86.24,相关系数为0.99,均方根误差为0.41,平均绝对误差为0.32,这些都说明两组数理统计数据的相关性较强。

表2 莫喀高铁沿线地区气象站与CRU格点数据协方差  
Table 2 Covariance of weather station and CRU grid data along Moscow-Kazan High-Speed Railway

西部地区	协方差	东部地区	协方差
莫斯科	86.24	下诺夫哥罗德	104.42
巴甫洛夫斯基	91.28	科兹莫杰米扬斯克	113.46
弗拉基米尔	96.47	切博克萨雷	115.23
		喀山	125.33

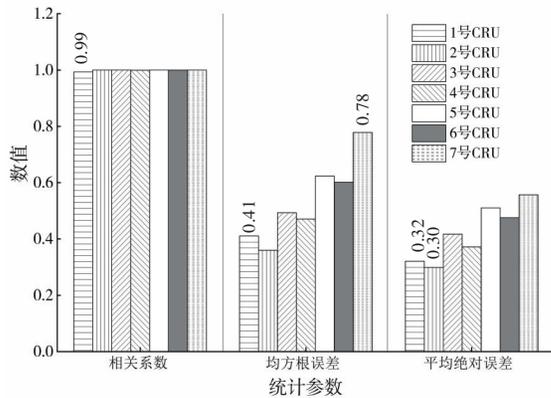


图4 气象站与对应CRU数据相关系数、均方根误差和平均绝对误差

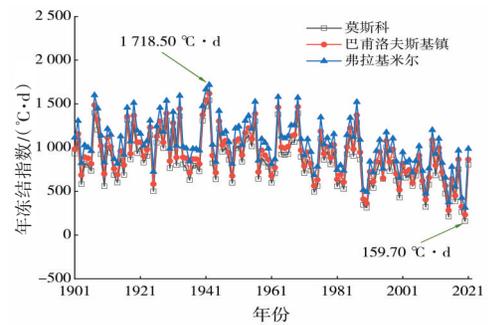
Fig. 4 Correlation coefficient, root mean square error, and average absolute error between weather station and corresponding CRU data

综上所述,CRU格点数据与所对应的气象站点数据有较强的正相关性,且月平均值较为接近。故在气象站数据缺失情况下,本研究采用CRU格点数据代替气象站数据来开展相应研究。为此,本研究采用CRU格点数据来分析莫喀高铁沿线地区冻融指数的时空变化特征,以为莫喀高铁的设计、施工及运营提供一定的科学指导。

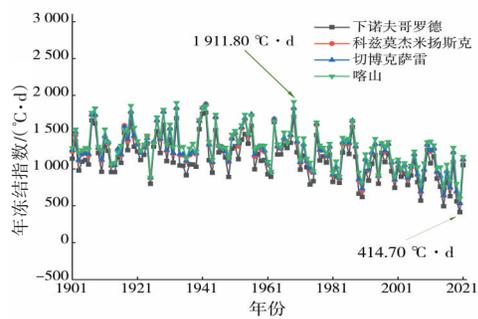
## 2.2 莫喀高铁沿线地区冻融指数随时间变化特征

图5给出了莫喀高铁沿线地区气象站1901—2021年的年冻结指数变化值。整体来看,莫喀高铁沿线地区的年冻结指数呈下降趋势,且下降趋

势处于一个水平。这表明:莫喀高铁沿线地区的气温处于一种上升的趋势,这对沿线地区冻土的发育和保存是不利的。具体来说:①莫斯科地区的年冻结指数值为159.70~1 540.80  $^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}$ ,其变化趋势为 $-3.40\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}\cdot\text{a}^{-1}$ ;②巴甫洛夫斯基地区的年冻结指数值为232.30~1 618.90  $^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}$ ,其变化趋势为 $-3.52\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}\cdot\text{a}^{-1}$ ;③弗拉基米尔地区的年冻结指数值为313.30~1 718.50  $^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}$ ,其变化趋势为 $-3.67\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}\cdot\text{a}^{-1}$ ;④下诺夫哥罗德地区的年冻结指数值为414.70~1 764.00  $^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}$ ,其变化趋势为 $-3.66\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}\cdot\text{a}^{-1}$ ;⑤科兹莫杰米扬斯克地区的年冻结指数值为529.10~1 883.90  $^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}$ ,其变化趋势为 $-3.74\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}\cdot\text{a}^{-1}$ ;⑥切博克萨雷地区的年冻结指数值为534.90~1 877.10  $^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}$ ,其变化趋势为 $-3.72\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}\cdot\text{a}^{-1}$ ;⑦喀山地区的年冻结指数值为598.90~1 911.80  $^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}$ ,其变化趋势为 $-3.59\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}\cdot\text{a}^{-1}$ 。



(a) 莫喀高铁沿线地区西部三地区



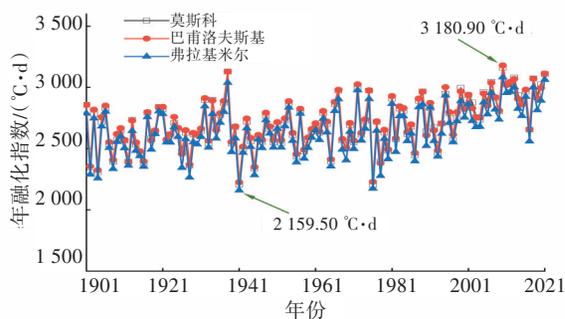
(b) 莫喀高铁沿线地区东部四地区

图5 莫喀高铁沿线地区气象站1901—2021年年冻结指数变化

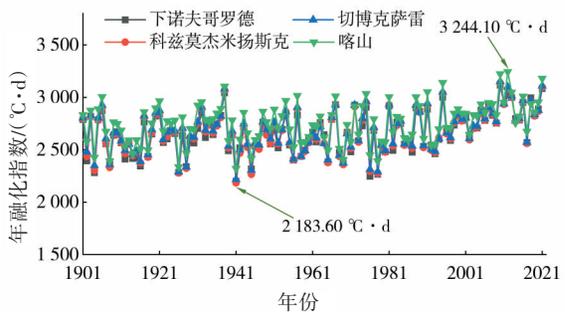
Fig. 5 Annual freezing index changes of weather stations along Moscow-Kazan High-Speed Railway from 1901 to 2021

莫喀高铁沿线地区气象站1901—2021年的年融化指数变化值如图6所示。从图6可以看出,莫喀高铁沿线地区的年融化指数呈上升趋势,且沿线东部三地区的变化趋势高于西部四地区的。这说明莫喀高铁沿线地区的气温处于一种上升趋

势。具体来说:①在莫斯科地区,年融化指数值为2 201.90~3 161.90 °C·d,其变化趋势为2.89 °C·d·a<sup>-1</sup>;②在巴甫洛夫斯基地区,年融化指数值为2 226.60~3 180.90 °C·d,其变化趋势为2.74 °C·d·a<sup>-1</sup>;③在弗拉基米尔地区,年融化指数值为2 159.50~3 082.60 °C·d,其变化趋势为2.58 °C·d·a<sup>-1</sup>;④在下诺夫哥罗德地区,年融化指数值为2 199.40~3 116.50 °C·d,其变化趋势为2.27 °C·d·a<sup>-1</sup>;⑤在科兹莫杰米扬斯克地区,年融化指数值为2 183.60~3 138.00 °C·d,其变化趋势为2.13 °C·d·a<sup>-1</sup>;⑥在切博克萨雷地区,年融化指数值为2 217.10~3 150.40 °C·d,其变化趋势为2.00 °C·d·a<sup>-1</sup>;⑦在喀山地区,年融化指数值为2 320.80~3 244.10 °C·d,其变化趋势为1.83 °C·d·a<sup>-1</sup>。



(a) 莫喀高铁沿线地区西部三地区



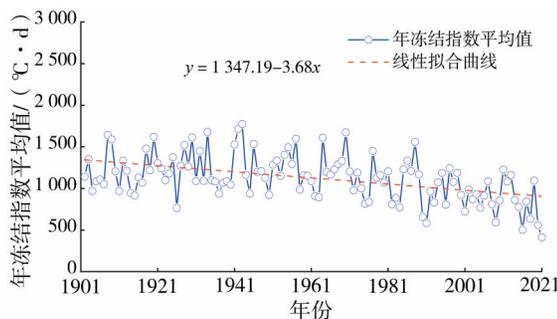
(b) 莫喀高铁沿线地区东部四地区

图6 莫喀高铁沿线地区气象站1901—2021年年融化指数变化

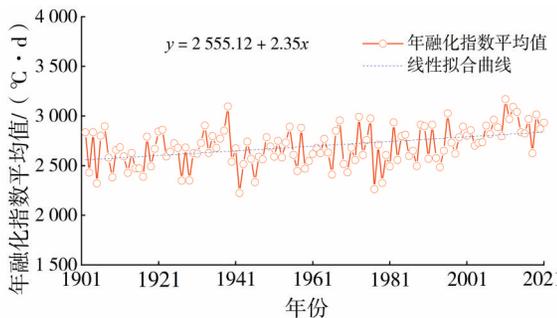
Fig. 6 Annual thawing index changes of weather stations along Moscow-Kazan High-Speed Railway from 1901 to 2021

本研究根据莫喀高铁沿线地区的72个CRU格点数据得出该地区121 a间的年冻结和融化指数变化特征,如图7所示。莫喀高铁沿线地区1901—2021年年冻结指数平均值为411.23~1 773.70 °C·d,变化趋势为-3.68 °C·d·a<sup>-1</sup>;莫喀高铁沿线地区1901—2021年年融化指数平均值为2 223.69~3 170.31 °C·d,变化趋势为2.35 °C·d·a<sup>-1</sup>。

由图5~7可知,1901—2021年的冻结指数逐渐递减,融化指数逐渐递增。这表明莫喀高铁沿线地区的年平均气温在逐渐升高。这种趋势将会对沿线地区冻土发育形成不利条件,从而影响拟建工程的稳定性,故应对这种趋势给予重点关注。



(a) 年冻结指数平均值



(b) 年融化指数平均值

图7 莫喀高铁沿线地区1901—2021年年冻结指数、年融化指数平均值随时间变化

Fig. 7 Variation of average annual freezing and thawing index along Moscow-Kazan High-Speed Railway from 1901 to 2021

### 2.3 莫喀高铁沿线地区冻融指数随空间变化特征

图8给出了莫喀高铁沿线地区典型年份(1901、1941、1981、2021年)冻结指数空间分布。总体来说,上述年份的冻结指数从西至东呈明显递增的趋势,最小值出现在莫斯科地区,最大值出现在喀山地区。具体来说:1901年,莫喀高铁沿线地区平均冻结指数为911.04~1 380.74 °C·d,由最西端的911.04 °C·d增大到最东端的1 380.74 °C·d;1941年,莫喀高铁沿线地区平均冻结指数为1 432.45~1 894.96 °C·d;1981年,莫喀高铁沿线地区平均冻结指数为557.60~1 015.72 °C·d;2021年,莫喀高铁沿线地区平均冻结指数为774.69~1 228.30 °C·d。

莫喀高铁沿线地区典型年份(1901、1941、1981及2021年)融化指数空间分布如图9所示。由图9可知,1901年和1941年,莫喀高铁沿线地区融化

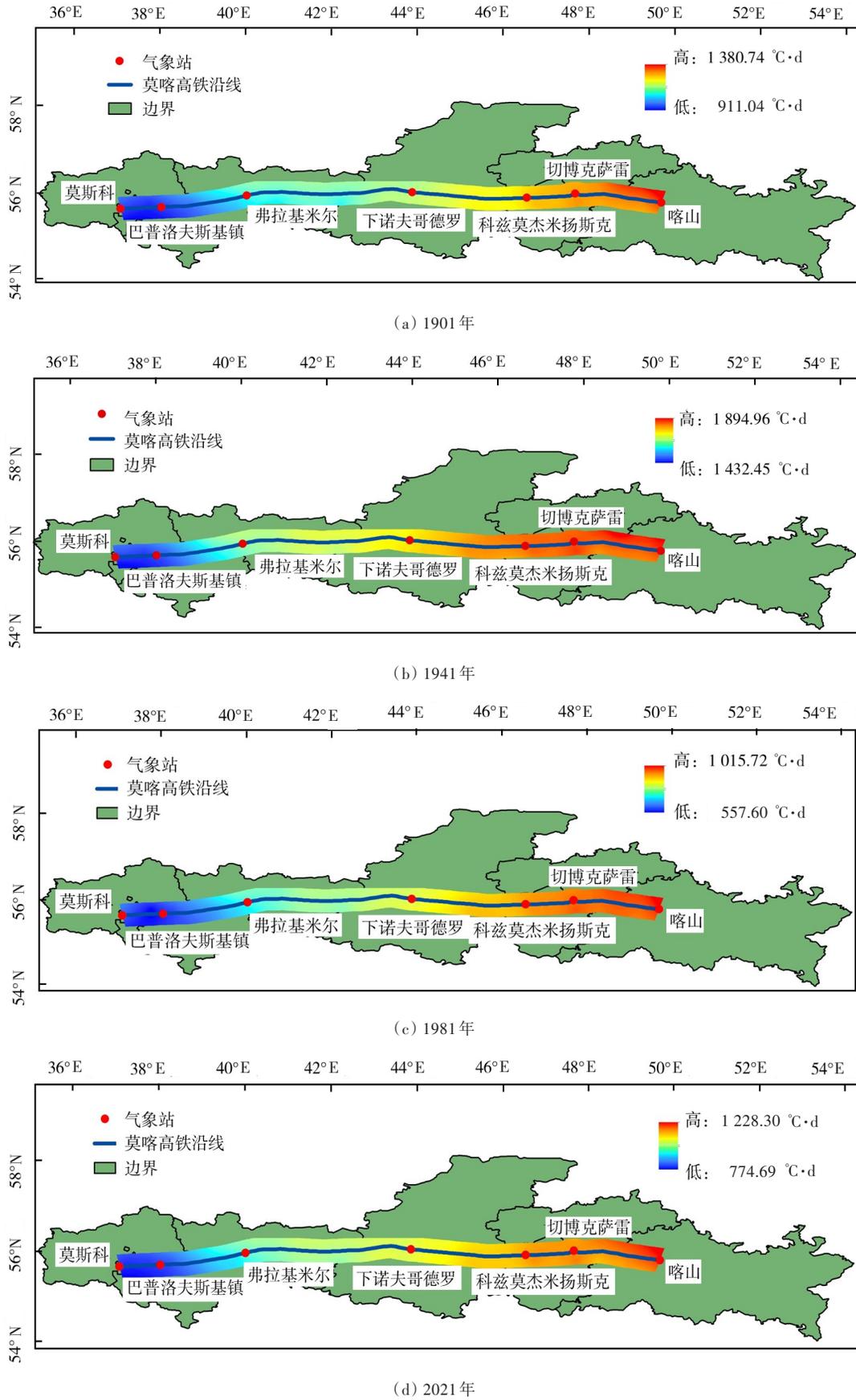


图8 莫喀高铁沿线地区典型年份冻结指数空间分布

Fig. 8 Spatial distributions of freezing index in typical years along Moscow-Kazan High-Speed Railway

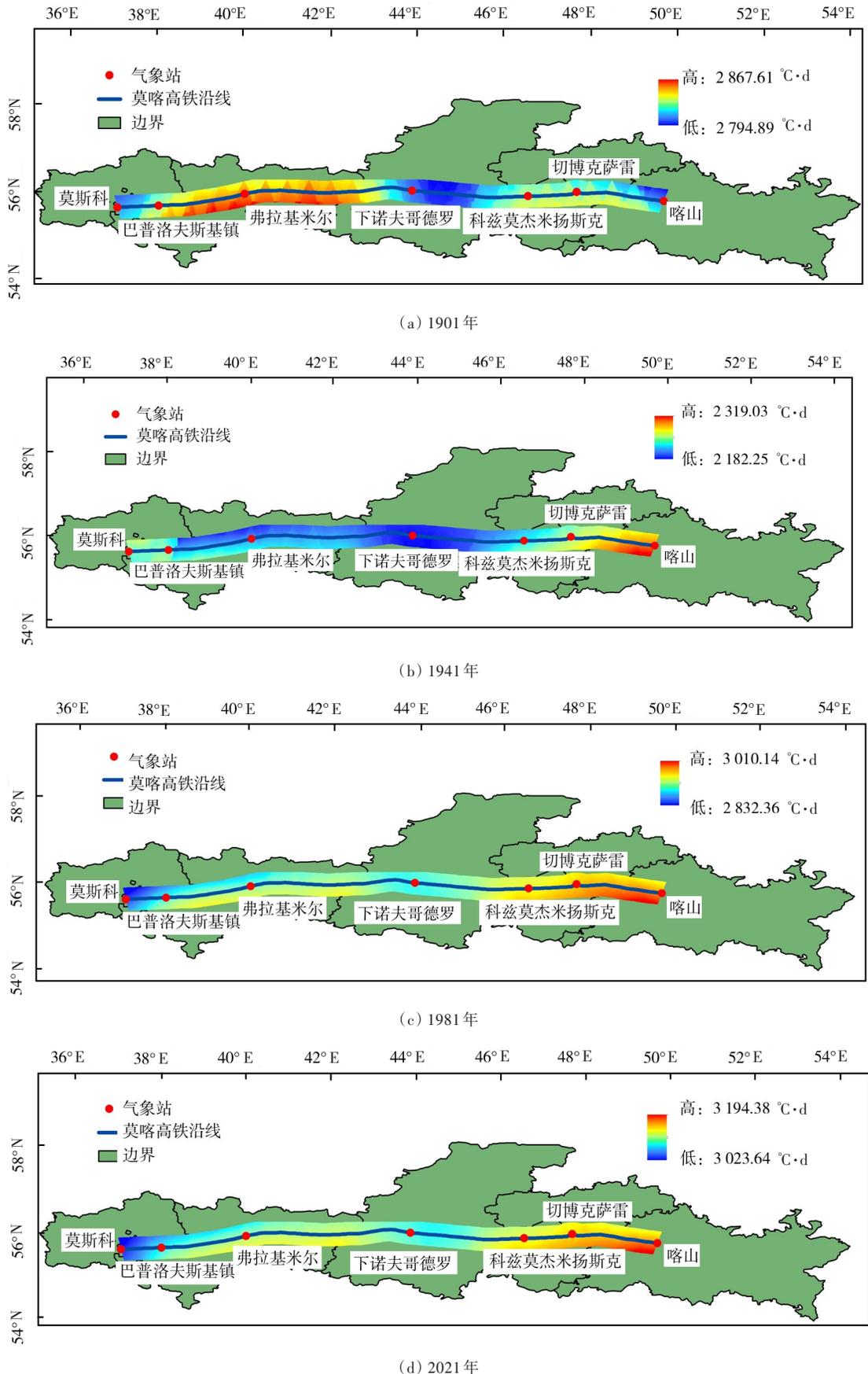


图 9 莫喀高铁沿线地区典型年份融化指数空间分布

Fig. 9 Spatial distributions of thawing index in typical years along Moscow-Kazan High-Speed Railway

指数呈明显的由中间向两侧逐渐增大的趋势,且变化范围不大。具体来说:1901年,融化指数为 $2\,794.89\sim 2\,867.61\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}$ ,其最大值分布在弗拉基米尔地区,最小值分布在下诺夫哥罗德地区;1941年,融化指数为 $2\,182.25\sim 2\,319.03\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}$ ,其最大值分布在喀山地区,最小值分布在下诺夫哥罗德地区;1981年,融化指数为 $2\,832.26\sim 3\,010.14\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}$ ;2021年,融化指数为 $3\,023.64\sim 3\,194.38\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}$ ;1981年和2021年,沿线地区融化指数呈明显的由西向东逐渐增大趋势,其最大值出现在喀山地区,最小值出现在莫斯科地区,且变化范围不大。

莫喀高铁沿线地区1901—2021年多年平均冻融指数空间分布如图10所示。从图10可以看出,冻结指数和融化指数空间分布出现了不同规律:

① 多年平均冻结指数为 $841.55\sim 1\,360.13\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}$ ,呈明显的由西向东递增的趋势,其最大值在喀山地区,最小值在莫斯科地区;② 多年平均融化指数由中部的 $2\,654.40\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}$ 增大到西侧的 $2\,704.23\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}$ 和东侧的 $2\,748.63\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}$ ,呈由中间向两侧逐渐增大的趋势,其最大值分布在莫喀高铁沿线地区的喀山,最小值分布在下诺夫哥罗德地区。

由图8~10可以看出,莫喀高铁沿线地区的冻结指数大体上自西向东逐渐递增,融化指数由中部地区向东西两侧逐渐递增。这表明:气温自下诺夫哥罗德到莫斯科地区逐渐降低,而自下诺夫哥罗德到喀山地区逐渐升高。因此,本研究证实:莫喀高铁沿线地区气温自西向东逐渐升高,莫斯科地区升温相对不明显,而喀山地区升温最明显。

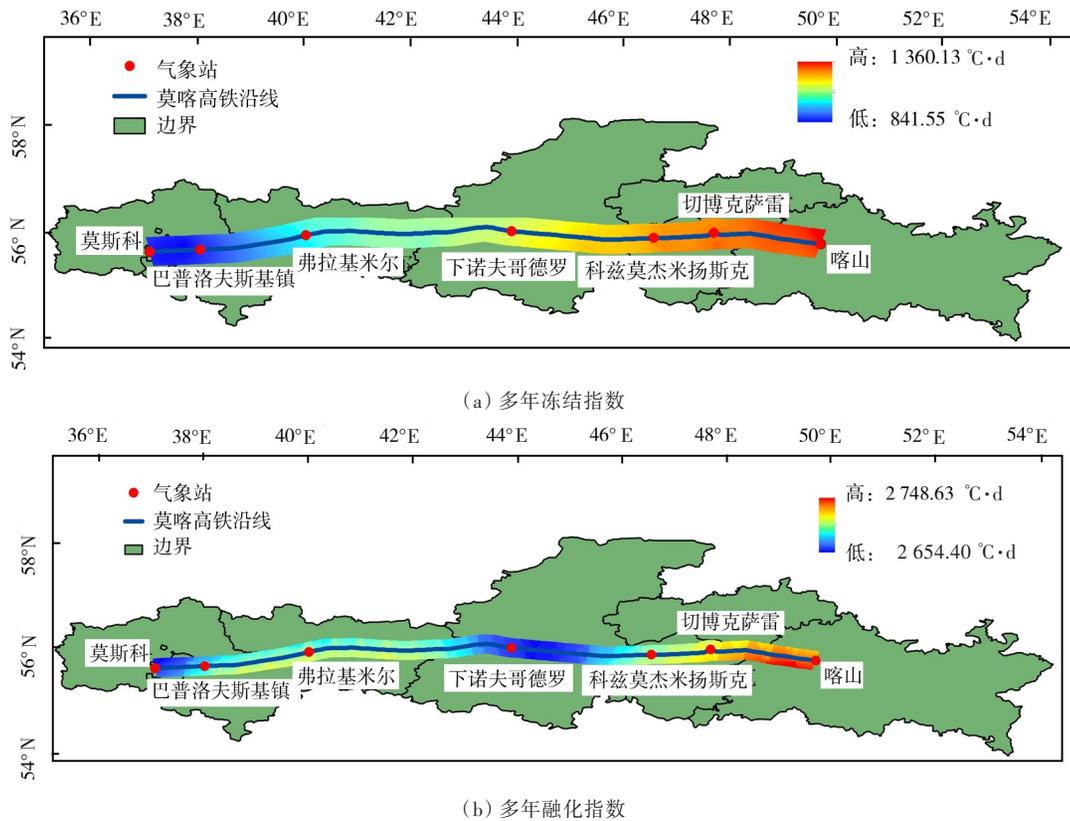


图10 莫喀高铁沿线地区1901—2021年多年平均冻结、多年融化指数的空间分布

Fig. 10 Spatial distributions of multi-year average freezing and thawing index along Moscow-Kazan High-Speed Railway from 1901 to 2021

### 3 讨论

在研究冻土时,冻融指数是一个重要的评价指标,也是气候变化的指示器<sup>[18]</sup>。气候气温变化

研究通常需要百年以上的时间序列资料。因此,本研究基于英国东英吉利大学气候研究中心1901—2021年CRU格点数据月平均气温数据集,研究了莫喀高铁沿线地区的大气冻融指数时间变化趋势及空间变化特征。一方面,根据莫喀高铁

沿线地区1901—2021年的年冻融指数平均值随时间变化情况发现,该地区的年冻结指数在逐渐递减,年融化指数在逐渐递增,因此可以判断莫喀高铁沿线地区的年平均气温大致随时间上升,进而影响该地区冻土存在状态;另一方面,根据莫喀高铁沿线地区1901—2021年多年冻融指数空间分布得出,该地区的多年平均冻结指数自西向东递增,而多年平均融化指数大体上由中部地区向东西两侧分别逐渐递增。这表明,气温自下诺夫哥罗德到莫斯科地区逐渐降低,自下诺夫哥罗德到喀山地区逐渐升高,即莫喀高铁沿线地区气温自西向东逐渐升高,莫斯科地区升温相对不明显,而喀山升温最明显。

这些研究结果为莫喀高铁沿线地区环境评估、工程建设提供了有效科学依据,同时也有助于更好地了解该地区的冻土存在状态和气候变化特征。值得注意的是,本文主要研究莫喀高铁沿线大气温度冻融指数时空变化特征,但并未将沿线湿度变化纳入研究。湿度作为衡量气候变化的一个重要因素<sup>[29-33]</sup>,能够影响大气与地表之间的水热交换等进程。本课题组在对莫喀高铁沿线地区气候变化规律展开后续研究时,将会把该地区的湿度分布特征纳入精细化研究。

## 4 结论

基于CRU格点数据,本文研究了莫喀高铁沿线地区1901—2021年冻融指数的时空变化特征。本文主要结论如下:

1) 莫喀高铁沿线地区气象站点与对应CRU格点气温月平均温差绝对值的平均值范围在0.30~0.56℃,其协方差、相关系数、均方根误差及平均绝对误差都表明,CRU格点数据在莫喀高铁沿线地区具有较强的适用性。

2) 莫喀高铁沿线地区1901—2021年冻结指数总体呈波动下降趋势,而该地区1901—2021年融化指数却呈波动上升趋势。莫喀高铁沿线地区多年平均冻结指数在空间上呈由西向东递增趋势,而多年平均融化指数在空间上呈由中部向东西两侧递增趋势。

3) 从莫喀高铁沿线地区1901—2021年冻融

指数的时间变化和空间变化特征发现,该地区气温处于一种上升趋势。这对沿线地区的冻土发育和拟建的工程产生不利影响。因此,业内应对该地区的冻土发育不利影响予以重点关注。

本文研究成果可较好反映莫喀高铁沿线地区气候变化特征,为莫喀高铁设计、施工和运营提供长时间序列的气候资料支撑,助力我国企业深入参与高纬度重大基础工程建设。

### [参考文献]

- [1] 王铁行,赵再昆,金鑫,等.考虑荷载影响的黄土冻胀特性研究[J].冰川冻土,2020,42(4):1249-1255. DOI: 10.7522/j.issn.1000-0240.2019.0076. WANG Tiehang, ZHAO Zaikun, JIN Xin, et al. Frost heaving characteristics for loess under different load [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2020, 42(4): 1249-1255. DOI: 10.7522/j.issn.1000-0240. 2019. 0076.
- [2] 许健,高靖寓,李彦锋,等.粗颗粒盐渍土地基掏挖基础抗拔承载模型试验研究[J].岩土工程学报,2019,41(11):2079-2085. DOI: 10.11779/CJGE201911013. XU Jian, GAO Jingyu, LI Yanfeng, et al. Model tests on uplift behaviors of belled pier foundation in coarse-grained salty soils [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, 41(11): 2079-2085. DOI: 10. 11779/ CJGE201911013.
- [3] 许健,张明辉,李彦锋,等. Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>盐渍原状黄土冻融过程劣化特性试验研究[J].岩土工程学报,2020,42(9):1642-1650. DOI: 10.11779/CJGE202009008. XU Jian, ZHANG Minghui, LI Yanfeng, et al. Experimental study on deterioration behavior of saline undisturbed loess with sodium sulphate under freeze-thaw action [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2020, 42(9): 1642-1650. DOI: 10. 11779/ CJGE202009008.
- [4] 韩龙武,蔡汉成,程佳,等.莫斯科—喀山高速铁路沿线地区季节性冻土冻融特征[J].交通运输工程学报,2018,18(3):44-55. DOI: 10.3969/j.issn.1671-1637.2018.03.005. HAN Longwu, CAI Hancheng, CHENG Jia, et al. Freezing and thawing characteristics of seasonal frozen soil along Moscow-Kazan High-Speed Railway [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2018, 18(3): 44-55. DOI: 10.3969/j.issn.1671-1637. 2018.03.005.
- [5] 刘大园,庞玲,姚力.莫斯科至喀山高铁轨道设计综述[J].山西建筑,2020,46(11):126-127,184. DOI: 10.3969/j.issn.1009-6825.2020.11.058.

- LIU Dayuan, PANG Ling, YAO Li. The track design summary of high-speed railway from Moscow to Kazan [J]. *Shanxi Architecture*, 2020, 46(11): 126-127, 184. DOI: 10.3969/j.issn.1009-6825.2020.11.058.
- [6] 翟一霖. 莫斯科—喀山高铁气候环境特点及分析对比[J]. *铁道通信信号*, 2017, 53(增刊2): 143-144. DOI: 10.13879/j.issn1000-7458.2017-S2.17218.
- ZHAI Yilin. Analysis and comparison of climatic environment characteristics of Moscow-Kazan High-Speed Railway [J]. *Railway Signalling & Communication*, 2017, 53(Sup. 2): 143-144. DOI: 10.13879/j.issn1000-7458.2017-S2.17218.
- [7] 章昊. 基于时序InSAR方法的莫喀高铁沿线地区冻土形变监测[D]. 成都: 西南交通大学, 2020. DOI: 10.27414/d.cnki.gxnju.2020.001738.
- ZHANG Hao. Monitoring of permafrost deformation along Moscow-Kazan High-Speed Railway based on time series INSAR method [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2020. DOI: 10.27414/d.cnki.gxnju.2020.001738.
- [8] 王欣杰.“一带一路”背景下莫喀高铁项目建设阶段承包商风险管理实证研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2017.
- WANG Xinjie. An empirical study on the contractor's riskmanagement in the constructing stage of MO-KA High-Speed Rail Project in B&R background [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2017.
- [9] WU Q B, ZHANG T J. Changes in active layer thickness over the Qinghai-Xizang Plateau from 1995 to 2007 [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2010, 115(D9): D09107. DOI: 10.1029/2009JD012974.
- [10] LUO D L, JIN H J, LYU L Z, et al. Spatiotemporal changes in extreme ground surface temperatures and the relationship with air temperatures in the Three-River Source Regions during 1980—2013 [J]. *Theoretical and Applied Climatology*, 2016, 123(3): 885-897. DOI: 10.1007/s00704-015-1543-6.
- [11] 肖杰, 何光锋, 常锦, 等. AT固化粉土无侧限抗压强度及耐冻融性能研究[J]. *长沙理工大学学报(自然科学版)*, 2023, 20(6): 17-26. DOI: 10.19951/j.cnki.1672-9331.20220609001.
- XIAO Jie, HE Guangfeng, CHANG Jin, et al. Study on unconfined compressive strength and freeze-thaw resistance of AT-solidified silty soil [J]. *Journal of Changsha University of Science & Technology (Natural Science)*, 2023, 20(6): 17-26. DOI: 10.19951/j.cnki.1672-9331.20220609001.
- [12] 郑健龙, 张洪刚, 钱国平, 等. 水温冻融循环条件下沥青混合料性能衰变的规律[J]. *长沙理工大学学报(自然科学版)*, 2010, 7(1): 7-11. DOI: 10.3969/j.issn.1672-9331.2010.01.002.
- ZHENG Jianlong, ZHANG Honggang, QIAN Guoping, et al. Attenuated performance of asphalt mixture under freeze-thaw cycle with water and temperature [J]. *Journal of Changsha University of Science & Technology (Natural Science)*, 2010, 7(1): 7-11. DOI: 10.3969/j.issn.1672-9331.2010.01.002.
- [13] LIU W H, XIE C W, ZHAO L, et al. Dynamic changes in lakes in the Hoh Xil region before and after the 2011 outburst of Zonag Lake [J]. *Journal of Mountain Science*, 2019, 16(5): 1098-1110. DOI: 10.1007/s11629-018-5085-0.
- [14] RISEBOROUGH D W. Thawing and freezing indices in the active layer [C]//*Proceedings of the 8th International Conference on Permafrost*. Rotterdam, NL: AA Balkema, 2003: 953-958.
- [15] 姜逢清, 胡汝骥, 李珍. 青藏铁路沿线地区1966—2004年冻结与融化指数的变化趋势[J]. *地理学报*, 2007, 62(9): 935-945. DOI: 10.3321/j.issn:0375-5444.2007.09.005.
- JIANG Fengqing, HU Ruji, LI Zhen. Variation trends of the freezing and thawing index along the Qinghai-Xizang Railway for the period 1966—2004 [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2007, 62(9): 935-945. DOI: 10.3321/j.issn:0375-5444.2007.09.005.
- [16] 廖莹, 范继辉, 李恰颖, 等. 1978—2017年青藏高原冻融指数时空变化特征[J]. *草业科学*, 2021, 38(6): 1035-1046. DOI: 10.11829/j.issn.1001-0629.2020-0592.
- LIAO Ying, FAN Jihui, LI Yiyi, et al. Spatiotemporal variations in freezing and thawing indices on the Xizang Plateau during 1978—2017 [J]. *Pratacultural Science*, 2021, 38(6): 1035-1046. DOI: 10.11829/j.issn.1001-0629.2020-0592.
- [17] 欧安锋, 柯贤敏, 梁成成, 等. 祁连山区1961—2014年冻融指数时空变化特征[J]. *冰川冻土*, 2023, 45(1): 153-164. DOI: 10.7522/j.issn.1000-0240.2023.0011.
- OU Anfeng, KE Xianmin, LIANG Chengcheng, et al. Spatial and temporal characteristics of freezing and thawing index in the Qilian Mountains from 1961 to 2014 [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2023, 45(1): 153-164. DOI: 10.7522/j.issn.1000-0240.2023.0011.
- [18] 彭小清. 北半球季节冻土时空变化特征及其对气候变化的响应[D]. 兰州: 兰州大学, 2017.
- PENG Xiaoqing. Spatial-temporal variations of seasonally frozen ground and its response to climate change in the Northern Hemisphere [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2017.
- [19] FRAUENFELD O W, ZHANG T J, MCCREIGHT J L.

- Northern Hemisphere freezing/thawing index variations over the twentieth century [J]. *International Journal of Climatology*, 2007, 27(1): 47-63. DOI: 10.1002/joc.1372.
- [20] LUO D L, JIN H J, JIN R, et al. Spatiotemporal variations of climate warming in northern Northeast China as indicated by freezing and thawing indices [J]. *Quaternary International*, 2014, 349: 187-195. DOI: 10.1016/j.quaint.2014.06.064.
- [21] WU T H, QIN Y H, WU X D, et al. Spatiotemporal changes of freezing/thawing indices and their response to recent climate change on the Qinghai-Xizang Plateau from 1980 to 2013 [J]. *Theoretical and Applied Climatology*, 2018, 132(3): 1187-1199. DOI: 10.1007/s00704-017-2157-y.
- [22] PENG X Q, ZHANG T J, LIU Y J, et al. Past and projected freezing/thawing indices in the Northern Hemisphere [J]. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 2019, 58(3): 495-510. DOI: 10.1175/jamc-d-18-0266.1.
- [23] 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. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.01.121.
- [24] 刘磊, 罗栋梁. 1977—2017年雅江流域中下游大气/地面冻融指数时空变化特征 [J]. *冰川冻土*, 2020, 42(3): 812-822. DOI: 10.7522/j.issn.1000-0240.2019.0048.
- LIU Lei, LUO Dongliang. Spatial and temporal characteristics of air/ground freezing and thawing index in the middle and lower reaches of the Yarlung Zangbo River during 1977—2017 [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2020, 42(3): 812-822. DOI: 10.7522/j.issn.1000-0240.2019.0048.
- [25] 陈聪, 彭小清, 李璇佳, 等. 基于观测数据的全球大气冻融指数变化研究 [J]. *冰川冻土*, 2023, 45(2): 509-520. DOI: 10.7522/j.issn.1000-0240.2023.0039.
- CHEN Cong, PENG Xiaoqing, LI Xuanjia, et al. Study on the change of global air freezing/thawing index based on observations [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2023, 45(2): 509-520. DOI: 10.7522/j.issn.1000-0240.2023.0039.
- [26] 闻新宇, 王绍武, 朱锦红, 等. 英国 CRU 高分辨率格点资料揭示的 20 世纪中国气候变化 [J]. *大气科学*, 2006, 30(5): 894-904.
- WEN Xinyu, WANG Shaowu, ZHU Jinhong, et al. An overview of China climate change over the 20th century using UK UEA/CRU high resolution grid data [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2006, 30(5): 894-904.
- [27] 余威. 气象相似性网络构建及缺失气象要素数据的插补 [D]. 重庆: 西南大学, 2015.
- YU Wei. Construct meteorological similarity network and missing meteorological elements data interpolation [D]. Chongqing: Southwest University, 2015.
- [28] 陈方方, 罗栋梁, 刘磊, 等. 1901—2018年三江源地区大气冻融指数变化特征 [J]. *冰川冻土*, 2021, 43(2): 417-426. DOI: 10.7522/j.issn.1000-0240.2021.0015.
- CHEN Fangfang, LUO Dongliang, LIU Lei, et al. Variations of air freezing/thawing index during 1901—2018 in the Three-River Source Region [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2021, 43(2): 417-426. DOI: 10.7522/j.issn.1000-0240.2021.0015.
- [29] 保鸿燕. 全球土壤湿度的记忆性特征及其气候效应 [D]. 兰州: 兰州大学, 2017.
- BAO Hongyan. Memory and climate effects of soil moisture [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2017.
- [30] ZHANG Q, YANG J H, WANG W, et al. Climatic warming and humidification in the arid region of Northwest China: multi-scale characteristics and impacts on ecological vegetation [J]. *Journal of Meteorological Research*, 2021, 35(1): 113-127. DOI: 10.1007/s13351-021-0105-3.
- [31] WANG Z W, SUN S Q, WANG G X, et al. Spatial-temporal differentiation of supra- and sub-permafrost groundwater contributions to river runoff in the Eurasian Arctic and Qinghai-Xizang Plateau permafrost regions [J]. *Water Resources Research*, 2024, 60(3): e2023WR035913. DOI: 10.1029/2023WR035913.
- [32] VIHMA T. Effects of Arctic Sea ice decline on weather and climate: a review [J]. *Surveys in Geophysics*, 2014, 35(5): 1175-1214. DOI: 10.1007/s10712-014-9284-0.
- [33] 蔡子怡, 游庆龙, 陈德亮, 等. 北极快速增暖背景下冰冻圈变化及其影响研究综述 [J]. *冰川冻土*, 2021, 43(3): 902-916. DOI: 10.7522/j.issn.1000-0240.2021.0058.
- CAI Ziyi, YOU Qinglong, CHEN Deliang, et al. Review of changes and impacts of the cryosphere under the background of rapid Arctic warming [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2021, 43(3): 902-916. DOI: 10.7522/j.issn.1000-0240.2021.0058.

(责任编辑:彭三军;校对:毛娜)