

中蒙俄经济走廊地区年平均气温 1-km 栅格数据集 (1982–2018)

焦悦^{1,2}, 杨久春¹, 李广帅^{1,3}, 于灵雪^{1*}, 包玉龙⁴, 张树文¹

1. 中国科学院东北地理与农业生态研究所遥感与地理信息研究中心, 长春 130102;
2. 辽宁师范大学生命科学学院, 大连 116081; 3. 长春师范大学地理科学学院, 长春 130032;
4. 内蒙古师范大学地理科学学院, 呼和浩特 010022

摘要: 以中蒙俄经济走廊的大陆部分为研究区, 运用 325 个气象站点实测数据, 结合地形等要素, 利用 ANUSPLIN 气象插值软件对数据进行空间插值, 得到中蒙俄经济走廊地区年平均气温 1-km 栅格数据集 (1982–2018)。采用决定系数 (R^2) 验证插值结果与气象站点数据的相关性, R^2 均大于 0.980。采用平均绝对误差 (MAE) 和均方根误差 (RMSE) 作为精度评价指标, MAE 和 RMSE 平均值分别为 0.348、0.481 °C。数据集包括: (1) 研究区边界数据; (2) 1982–2018 年历年的年平均气温栅格数据。数据集存储为 .shp、.tif 和 .mdd 格式, 空间分辨率为 1 km, 由 159 个数据文件组成, 数据量为 8.65 GB (压缩为 2 个文件, 531 MB)。

关键词: 年平均气温; 中蒙俄经济走廊; 1 公里栅格数据; 1982–2018

DOI: <https://doi.org/10.3974/geodp.2022.02.08>

CSTR: <https://cstr.escience.org.cn/CSTR:20146.14.2022.02.08>

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.2022.01.03.V1> 或 <https://cstr.escience.org.cn/CSTR:20146.11.2022.01.03.V1>。

1 前言

据 IPCC 第六次报告显示, 自 1850–1900 年以来, 全球地表平均温度已上升约 1 °C, 并且极端天气事件频发, 全球气候变化使人类面临着前所未有的挑战^[1]。气温数据是反映一个地区气候特征的重要参数数据, 也是研究全球变暖及其效应的基础数据之一, 因此高精度与高时间、空间分辨率的气象观测数据对研究不同区域的气温变化具有重要的意义^[2,3]。

近年来, 许多学者对于近地面气温数据的空间插值方法进行对比, 寻求最优空间插值方法, 其中主要包括 ArcGIS 中克里金插值、反距离权重、多元线性回归等方法以及以

收稿日期: 2022-02-20; 修订日期: 2022-05-30; 出版日期: 2022-06-25

基金项目: 国家自然科学基金 (42071025)

*通讯作者: 于灵雪 0000-0002-5565-535X, 中国科学院东北地理与农业生态研究所, yulingxue@iga.ac.cn

数据引用方式: [1] 焦悦, 杨久春, 李广帅等. 中蒙俄经济走廊地区年平均气温 1-km 栅格数据集 (1982–2018) [J]. 全球变化数据学报, 2022, 6(2): 225–233. <https://doi.org/10.3974/geodp.2022.02.08>.
<https://cstr.escience.org.cn/CSTR:20146.14.2022.02.08>.
[2] 焦悦, 杨久春, 李广帅等. 中蒙俄经济走廊地区平均气温时空数据集 (1982–2018, 1-km/y). 全球变化数据仓储电子杂志, 2022. <https://doi.org/10.3974/geodb.2022.01.03.V1>.
<https://cstr.escience.org.cn/CSTR:20146.11.2022.01.03.V1>.

ANUSPLIN 为代表的一系列专用于空间气象数据插值软件,而 ANUSPLIN 气象插值软件被证明是精度较高的方法^[4-9]。ANUSPLIN 气象插值软件是基于薄盘光滑样条函数为基本原理,专门针对气象数据进行曲面拟合的软件^[10]。赵美艳等、Wen 等利用 ANUSPLIN 软件对重庆、安徽的气温进行空间插值,发现 ANUSPLIN 空间插值方法适用于地形较为复杂等情况,拟合效果较好^[11,12]。湛稳等和王军邦等对中国气温和降水进行了 ANUSPLIN 空间插值分析,均发现插值结果符合中国大陆的气候变化特征^[13,14]。陈金雨等认为 ANUSPLIN 软件进行空间插值也能够较好的反映中巴经济走廊地区气象要素时空分布特征^[15]。

中蒙俄经济走廊作为“一带一路六大经济走廊”之一,推动了东北亚区域经济一体化进程^[16,17]。而区域的自然地理条件在很大程度上制约着经济的发展。它反映了陆地表面的热量变化,也影响了植被、水文等诸多要素^[18]。因此,研究中蒙俄经济走廊地区的气温分布对该区域经济发展有着重要的作用。然而,根据现有的气温数据集,不能满足中蒙俄经济走廊地区气候变化研究的实际需要,对该地区气候变化研究发展有一定的阻碍作用。

目前对气温的插值多以本国为主,国际合作背景下,国际间合作共同分析自然环境变化的研究更是未来科学研究发展的必然趋势。本数据集通过利用多源数据获取中蒙俄经济走廊地区气象站点数据,利用 ANUSPLIN 软件引入高程作为协变量,对中蒙俄经济走廊地区的年平均气温进行空间插值,最终得到中蒙俄经济走廊地区年平均气温 1-km 栅格数据集(1982–2018)。

2 数据集元数据简介

《中蒙俄经济走廊地区平均气温时空数据集(1982–2018)》^[19]的名称、短名名称、作者信息、地理区域、数据年代、数据空间分辨率、数据出版单位、数据共享服务平台、数据集组成等信息列于表 1。

3 数据研发方法

3.1 数据来源

本数据集中所采用的中国地区的气象站点数据来自于国家气象科学数据中心所提供的中国地面气候资料年值数据集^[21],选取 119 个地面气象站点;蒙古和俄罗斯地区的气象站点数据均来自于美国国家海洋和大气管理局(National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA)提供的每日观测数据^[22],各选取 28 个和 178 个地面气象站点。最终共选取 325 个地面气象站点用于插值 1982–2018 年中蒙俄经济走廊地区年平均气温(图 1)。

DEM 数据来源于全球多分辨率地形高程数据(Global Multi-resolution Terrain Elevation Data, GMTED2010),是美国地质调查局(United States Geological Survey, USGS)和美国国家地理空间情报局(National Geospatial-Intelligence Agency, NGA)共同推出的全球陆地区域的空间数据集^[23]。该数据集发布于 2010 年,空间分辨率为 30 弧秒。本研究中的 DEM 数据是以 GMTED2010 数据为基础,通过空间处理,空间分辨率为 1 km(图 1)。

表 1 《中蒙俄经济走廊地区平均气温时空数据集（1982–2018，1-km/y）》元数据简表	
条目	描述
数据集名称	中蒙俄经济走廊地区平均气温时空数据集（1982–2018，1-km/y）
数据集短名	CMREC_Temperature_1982-2018
作者信息	焦悦 0000-0003-4160-4540，中国科学院东北地理与农业生态研究所，jiaoyue@iga.ac.cn 杨久春，中国科学院东北地理与农业生态研究所，yangjiuchun@iga.ac.cn 李广帅，中国科学院东北地理与农业生态研究所，liguangshuai@iga.ac.cn 于灵雪 0000-0002-5565-535X，中国科学院东北地理与农业生态研究所，yulingxue@iga.ac.cn 包玉龙，内蒙古师范大学地理科学学院，baoyulong@imnu.edu.cn 张树文，中国科学院东北地理与农业生态研究所，zhangshuwen@iga.ac.cn
地理区域	地理范围包括 27°47'N–61°57'N，25°51'E–157°51'E
数据年代	1982–2018 年
时间分辨率	1 年
空间分辨率	1 km
数据文件个数	159
数据格式	.shp、.tif、.mdd
数据量	8.65 GB (压缩为 2 个文件 531 MB)
数据集组成	包括 1982–2018 年历年中蒙俄经济走廊地区年平均气温数据文件（.tif 和 .mdd 格式）和 1 组中蒙俄经济走廊大陆部分边界矢量文件（.shp）。.tif 气温数据文件名称为 tempyyyy.tif，表示 yyyy 年的平均气温数据；.mdd 气温数据文件名称为 xxxx-yyyy.mdd，表示从 xxxx 年到 yyyy 年的年平均气温数据；矢量文件名称为 CMREC_BND.shp
基金项目	中国科学院（XDA2003020301）；国家自然科学基金（42071025）；中华人民共和国科学技术部（2017FY101301）
出版与共享服务平台	全球变化科学研究数据出版系统 http://www.geodol.ac.cn
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 ^[20]
数据和论文检索系统	DOI，CSTR，Crossref，DCI，CSCD，CNKI，SciEngine，WDS/ISC，GEOSS

3.2 算法原理

3.2.1 ANUSPLIN 气象插值

本数据集主要采用局部薄盘光滑样条函数的空间插值方法，该方法最早由 Wahba 于 1979 年提出，后由澳大利亚科学家 Hutchinson 改进，并开发 ANUSPLIN 气象插值软件。目前该软件已被广泛应用于气候变化要素空间插值领域^[24,25]。该软件是基于薄盘光滑样条函数为基本原理，其理论统计模型为^[26]：

$$Z_i = f(x_i) + b^T y_i + e_i (i = 1, 2, \dots, N)$$

(1)

式中， Z_i 是位于空间 i 点的因变量， $f(x_i)$ 是关于 x_i 的未知光滑函数， x_i 为 d 维样条独立变量， b^T 是关于 y_i 的 p 维系数， y_i 为 p 维独立协变量， e_i 是期望值为 0 且方差为 $w_i\sigma^2$ 的自变量随

机误差， w_i 为已知的相对误差方差， σ^2 为通常未知的所有数据点上的误差方差常数， N 是观测值的个数。

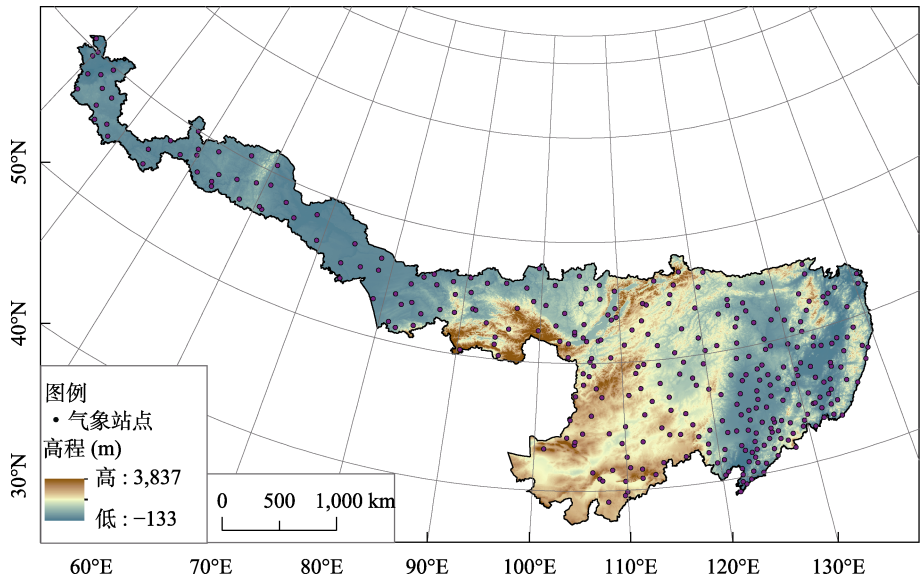


图1 中蒙俄国际经济走廊气象站点分布及 DEM 图

该软件引入了多元协变量线性子模型，在插值过程中自动选择最优拟合曲面，提高了空间插值的精度^[27]。

3.2.2 误差分析

为验证 ANUSPLIN 所选方案的插值精度，本文利用相关分析和误差分析对插值结果进行精度检验^[28-30]。为了检验台站的估算值与观测值之间的相关性，本文计算了决定系数 (R^2)。

$$R^2 = \frac{\sum_i (\hat{y}_i - y_i)^2}{\sum_i (y_i - \bar{y}_i)^2} \tag{2}$$

式中，分子表示使用预测值预测的残差；分母表示使用样本均值预测所有数据得到的残差。当 $R^2 < 0$ 时，表示模型预测的结果的残差比基准模型（用样本均值预测所有数据）得到的残差还要大，表示模型预测结果非常差。当 $R^2 > 0$ 时 R^2 越大，表示模型预测结果的残差越小，预测效果越好。

为检验插值结果误差，本文计算了均方根误差（RMSE）和平均绝对误差（MAE）。均方根误差可以作为衡量真实值与预测值误差的重要指标，即当 RMSE 值越小，则插值效果越好^[31]。

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m (x^{(i)} - y^{(i)})^2} \tag{3}$$

式中, m 为台站数, $x^{(i)}$ 和 $y^{(i)}$ 分别表示第 i 个台站的观测值与估算值。

平均绝对误差则反映的是真实误差, 是绝对误差的平均值。MAE 越小, 误差越小。

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^n |y_i - x_i|}{n} \quad (4)$$

式中, n 为台站数, y_i 和 x_i 表示第 i 个台站的观测值与估算值。

3.3 数据处理

本数据集数据处理过程主要分为: 数据准备、数据预处理和空间插值三部分^[14]。数据准备主要包括整合 1982–2018 年中蒙俄经济走廊地区 325 个地面气象站点台站表、年平均气温数据和 DEM 数据。数据预处理是将气象数据和 DEM 数据整理成 ANUSPLIN 软件可以利用的数据格式。其中, 将气象数据有缺失年份的站点予以剔除, 保证插值结果的一致性, 并且利用 SPSS 软件整理格式, 并输出为 ASCII 码数据格式; 将空间分辨率为 1 km 的 DEM 数据利用 ArcGIS 输出为 ASCII 码数据格式。利用 ANUSPLIN 软件完成空间插值, 分别运行 splina 和 lapgrd 程序, 将经纬度设置为自变量, 高程作为协变量进行插值, 最终利用 ArcGIS 将插值结果转化为.tif 格式栅格数据。

4 数据结果与验证

4.1 数据集组成

数据集包括: (1) 1982–2018 年历年中蒙俄经济走廊地区年平均气温数据文件 (.tif 和.mdd 格式); (2) 1 组中蒙俄经济走廊大陆部分边界矢量文件 (.shp)。
.tif 气温数据文件名称为 tempyyyy.tif, 表示 yyyy 年的平均气温数据; .mdd 气温数据文件名称为 xxxx-yyyy.mdd, 表示从 xxxx 年到 yyyy 年的年平均气温数据; 矢量文件名称为 CMREC_BND.shp。

4.2 气温数据插值结果

基于 ANUSPLIN 软件得到 1982–2018 年中蒙俄经济走廊地区的多年平均气温分布图 (图 2)。中蒙俄经济走廊地区的 37 年年平均气温为 1.24 °C, 中国区域年平均温度为 4.27 °C, 蒙古区域平均气温为 2.55 °C, 俄罗斯区域平均气温为 -0.37 °C。空间分布上, 研究区南北年平均气温差约 30 °C, 差异非常显著, 且基本呈自南向北递减、从沿海向内陆递减的分布特征。中国部分的内蒙古西部年平均气温达到 10 °C 以上, 是中蒙俄国际经济走廊年平均气温最高的地区, 由此地和辽河平原向东、向北气温逐渐降低。蒙古部分近 37 年年平均气温分布大致趋势为由南向北, 随着纬度的升高, 气温逐渐降低, 基本符合纬度地带性规律。俄罗斯部分由沿海向内陆年平均气温逐步降低。中蒙俄经济走廊气温分布除受纬度和海陆分布差异影响外, 还受地形地势的显著影响。中国的东北地区年平均气温的分布受地形的影响非常显著, 其分布和三面环山, 怀抱平原的形状有关, 东北平原中部温度高, 四周山地气温较低。中蒙俄经济走廊最冷的地区出现在由于地势较高导致温度骤降的俄罗斯远东山地区, 其中布里亚特共和国平均温度低至 -4.10 °C。

从中蒙俄经济走廊地区 1982–2018 年年平均气温变化倾斜率空间分布可得 (图 3), 中蒙俄经济走廊地区近 37 年平均气温呈明显的上升态势, 大部分地区年平均气温上升幅度在

0.01 °C/a 以上，局部地区如中国内蒙古中东部地区，部分区域上升幅度在 0.06 °C/a 以上。此外在中国黑龙江东部小兴安岭存在比较明显的气温下降区。中国东三省温度上升幅度在 0–0.05 °C/a 之间，而内蒙古自治区升温幅度由 0.01–0.06 °C/a 以上不等。中国东北地区存

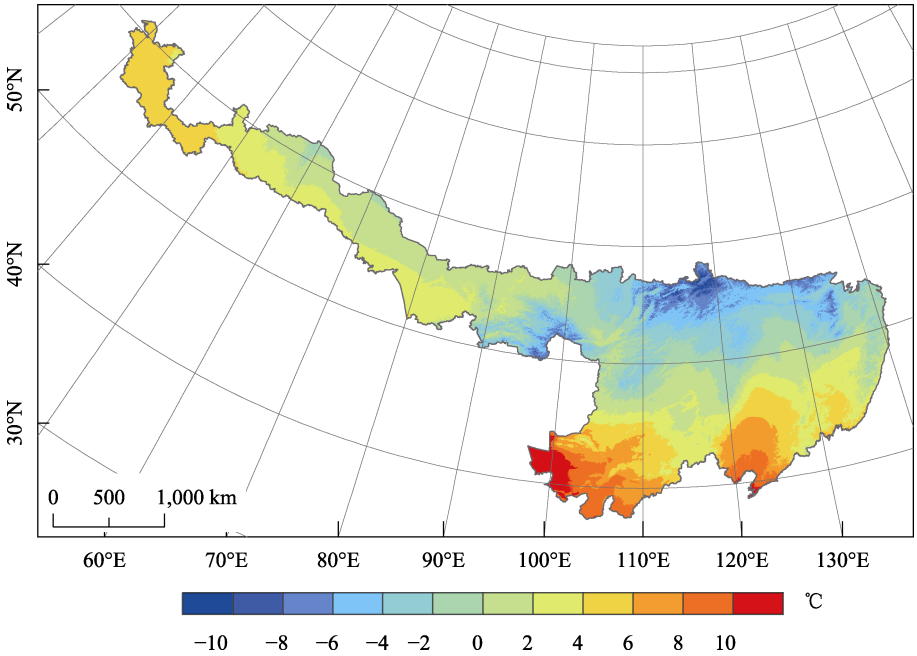


图2 中蒙俄经济走廊地区多年平均气温分布图

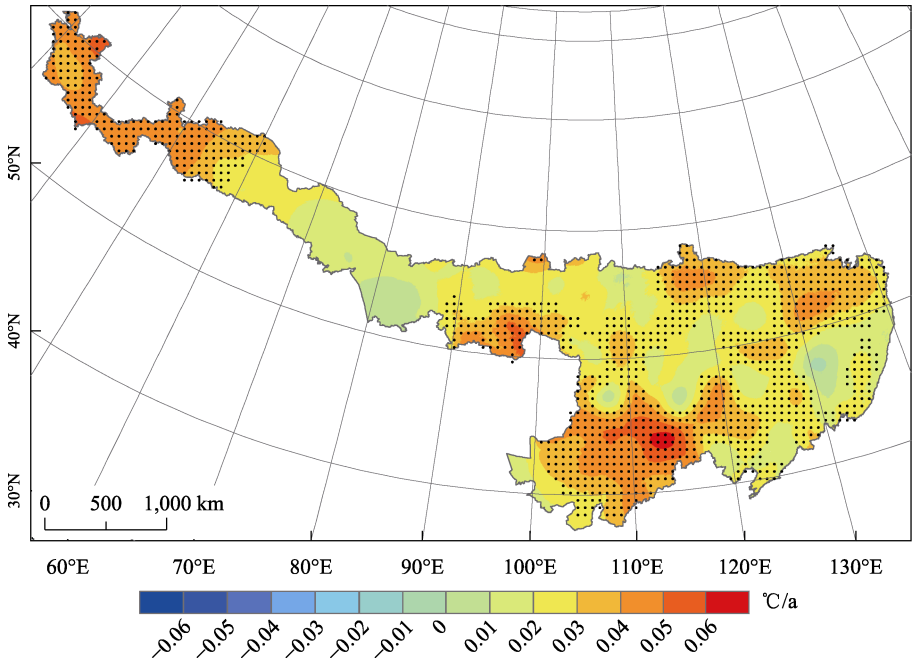


图3 中蒙俄经济走廊 1982–2018 年年平均气温变化倾斜率空间分布图

在一个明显的温度下降区，主要位于小兴安岭南部地区，而温度上升最显著的区域主要位于内蒙古自治区中部地区。蒙古国大部分地区温度变化在 $-0.01\sim 0.06\text{ }^{\circ}\text{C/a}$ 之间，这些地区主要分布在蒙古东南部地区。温度上升在 $0.05\text{ }^{\circ}\text{C/a}$ 以上的地区主要集中在蒙古东南部的东戈壁盟中部、南戈壁盟东北少数部分，中戈壁盟东南角以及苏赫巴托尔盟南部。俄罗斯部分温度变化处于 $0\sim 0.06\text{ }^{\circ}\text{C/a}$ 之间。西部地区温度较高且显著，大致以乌拉尔山脉为界，而中部的图瓦共和国升温也较为显著，升温速率大于 $0.05\text{ }^{\circ}\text{C/a}$ 。远东山地区也存在两个增温区，增温区升温速率大于 $0.04\text{ }^{\circ}\text{C/a}$ 。而升温速率较低的区域主要分布在滨海边疆区和阿尔泰边疆区，速率小于 $0.01\text{ }^{\circ}\text{C/a}$ 。

4.3 数据结果验证

利用中蒙俄经济走廊地区大陆部分 325 个气象观测站点的实地观测数据，对插值结果进行验证，验证结果如图 4 所示。

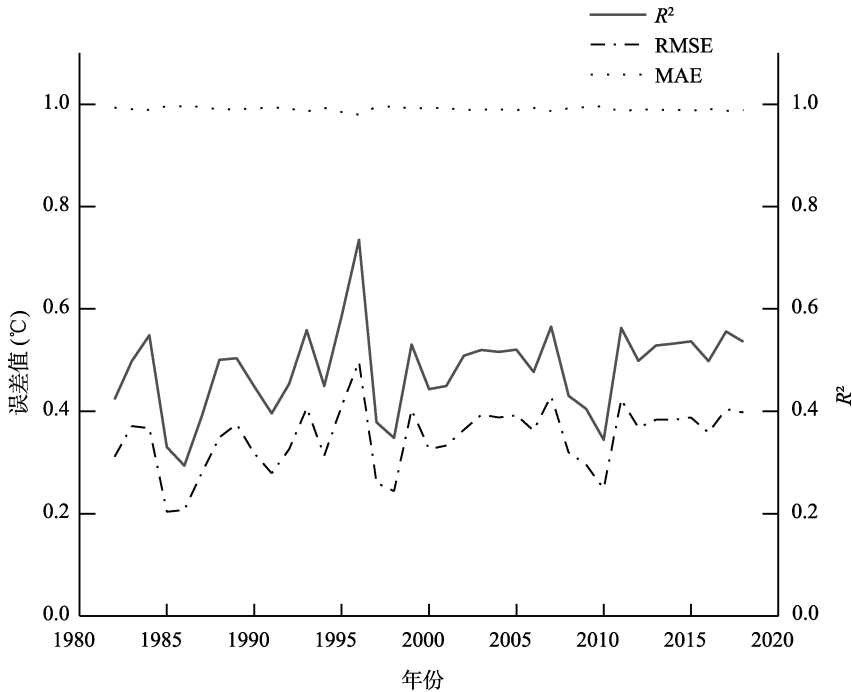


图 4 1982–2018 年平均气温与插值结果精度验证

验证结果表明，ANUSPLIN 软件以经纬度作为自变量，高程作为协变量，可以较好地模拟出中蒙俄经济走廊地区年平均气温的分布情况。决定系数（ R^2 ）范围为 0.980–0.996，均方根误差（RMSE）为 0.294–0.735 $^{\circ}\text{C}$ ，平均绝对误差（MAE）为 0.204–0.497 $^{\circ}\text{C}$ 。1996 年误差数值稍高于其他年份。总体来说，ANUSPLIN 插值算法在插值精度上相对较高。

5 讨论和总结

以中蒙俄经济走廊地区大陆部分 325 个气象观测站点数据以及地形为基础，运用

ANUSPLIN 气象插值软件, 最终得到了中蒙俄经济走廊地区平均气温时空数据集 (1982–2018, 1-km/y), 并利用气象站点的观测值与预测值进行验证。结果表明本研究得到的年平均气温分布数据能够有效的反映中蒙俄经济走廊地区的气温变化趋势。中蒙俄经济走廊地区的年平均气温南北差异非常显著, 且基本呈自南向北递减、从沿海向内陆递减的分布特征, 并且由于中蒙俄经济走廊地区地形起伏大, 从而产生了随海拔上升气温下降的气温分布规律。中蒙俄经济走廊地区大部分地区年平均气温呈现出显著升温的趋势, 这与全球气候变暖趋势基本一致^[1]。本数据集格式为栅格, 其代表了该栅格内气温分布的平均状况, 与气象站点的观测值有一定的区别, 气象站点数据来源较为广泛, 并且地形数据也对 DEM 数据进行了处理, 都对插值结果有一定的影响, 因此, 最终插值结果与实际气温分布状况有一定的误差, 在未来的研究中, 可以进一步提高插值结果精度与验证。综合以上研究, 本数据集可以为探究中蒙俄经济走廊地区气候变化特征提供数据支撑。

作者分工: 焦悦、于灵雪提供了对数据集开发的整体思路和对数据论文的修改审定; 于灵雪、焦悦、包玉龙采集了数据集的源数据。所有作者共同撰写了数据论文。

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] IPCC. Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [M]. Cambridge University Press, 2021.
- [2] 荆文龙, 杨雅萍, 乐夏芳. 中国 1-km 栅格月平均气温数据集[J]. 全球变化数据学报, 2017, 1(1): 66–73. <https://doi.org/10.3974/geodp.2017.01.10>. <https://cstr.escience.org.cn/CSTR:20146.14.2017.01.10>.
- [3] 杨艳昭, 郎婷婷, 张超等. 基于 GIS 的“一带一路”地区气温插值方法比较研究[J]. 地球信息科学学报, 2020, 22(4): 867–876.
- [4] 钱永兰, 吕厚荃, 张艳红. 基于 ANUSPLIN 软件的逐日气象要素插值方法应用与评估[J]. 气象与环境学报, 2010, 26(2): 7–15.
- [5] 姜晓剑, 刘小军, 黄芬等. 逐日气象要素空间插值方法的比较[J]. 应用生态学报, 2010, 21(3): 624–630.
- [6] 何轮凯, 孙立群, 李晴岚等. 深圳市气温空间插值方法比较[J]. 气象科技进展, 2019, 9(3): 179–184.
- [7] 刘焕莉, 范增禄, 韩明稚等. 基于 ANUSPLIN 的京津冀区域逐日气温格点数据集建立方法研究[J]. 海洋气象学报, 2020, 40(3): 111–120.
- [8] 彭彬, 周艳莲, 高苹等. 气温插值中不同空间插值方法的适用性分析——以江苏省为例[J]. 地球信息科学学报, 2011, 13(4): 539–548.
- [9] 易桂花, 张廷斌, 何奕萱等. 四种气温空间插值方法适用性分析[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2020, 47(1): 115–128.
- [10] 刘志红, Li, L. T., Tim, R. M., 等. 专用气候数据空间插值软件 ANUSPLIN 及其应用[J]. 气象, 2008(2): 92–100.
- [11] 赵美艳, 余君, 胡芸芸. 基于局部薄盘光滑样条函数的重庆地区气温空间插值[J]. 陕西气象, 2021(1): 50–55.
- [12] Wen, H. Y., Chen, F. J., L. J., *et al.* A Study on Spatial Interpolation of Temperature in Anhui Province Based on ANUSPLIN [J]. *Meteorological and Environmental Research*, 2019, 10(2): 51–55, 60.

- [13] 湛稳, 孙立群, 李晴岚等. 近 38 年中国气温和降水的 1km 网格数据集[J]. 气象科技, 2021, 49(3): 355–361.
- [14] 王军邦, 王居午, 叶辉等. 2000–2012 年全国气温和降水 1-km 网格空间插值数据集[J]. 中国科学数据(中英文网络版), 2017, 2(1): 73–80, 205–212.
- [15] 陈金雨, 陶辉, 刘金平. 1961–2015 年中巴经济走廊逐日气象数据集[J]. 中国科学数据(中英文网络版), 2021, 6(2): 229–238.
- [16] 乌兰巴根. 中蒙俄经济走廊已有成果、现有难题和未来建议[J]. 西部蒙古论坛, 2019(3): 64–72, 115.
- [17] 朴键一. “中蒙俄经济走廊”建设的主要特点和存在问题分析[J]. 东北亚学刊, 2020(6): 17–30, 145.
- [18] 葛君, 徐永飞, 安雪洋等. “一带一路”背景下中蒙俄经济走廊生态敏感区分析[J]. 生态学报, 2019, 39(14): 5051–5057.
- [19] 焦悦, 杨久春, 李广帅等. 中蒙俄经济走廊地区平均气温时空数据集 (1982–2018, 1-km/y) [J/DB/OL]. 全球变化数据仓储, 2022. <https://doi.org/10.3974/geodb.2022.01.03.V1>.
- [20] 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).
- [21] 孙葭, 章新平, 黄一民. 不同再分析降水数据在洞庭湖流域的精度评估[J]. 长江流域资源与环境, 2015, 24(11): 1850–1859.
- [22] 朱欢欢, 江志红, 李肇新. 从 CMIP5 到 CMIP6 的中国极端气候预估的新认识 (英文) [J]. *Science Bulletin*, 2021, 66(24): 2528–2537.
- [23] Danielson, J. J., Gesch, D. B. Global multi-resolution terrain elevation data 2010 (GMTED2010) [Z]. U.S. Geological Survey Open-File Report, 2011.
- [24] Hijmans, R. J., Cameron, S. E., Parra, J. L., et al. Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas [J]. *International Journal of Climatology*, 2005, 25(15): 1965–1978.
- [25] 叶伟林, 黄钰涵, 周自强等. 祁连山地区近 60 年气温时空变化特征[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(4): 1344–1353.
- [26] Hutchinson, M. F. Interpolation of rainfall data with thin plate smoothing splines—Part I: Two dimensional smoothing of data with short range correlation [J]. *Journal of Geographic Information and Decision Analysis*, 1998(2): 139–151.
- [27] 刘志红, Tim, R. M., Li, L. T., 等. 基于 ANUSPLIN 的时间序列气象要素空间插值[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2008(10): 227–234.
- [28] 徐谢亲, 祝明霞. 基于 GIS 的江西省气温空间插值方法比较[J]. 绿色科技, 2021, 23(10): 21–24.
- [29] 孟清. 秦岭山地降水的时空变化及栅格数据集的获取[D]. 西安: 西北大学, 2021.
- [30] 白燕. 秦岭-大巴山地区 NDVI 时空变化趋势数据集(2000–2019)[J]. 全球变化数据学报, 2020, 4(4): 346–353. <https://doi.org/10.3974/geodp.2020.04.05>. <https://cstr.escience.org.cn/CSTR:20146.14.2020.04.05>.
- [31] 严敏聪, 潘志豪, 沈碧辉等. 基于 Anusplin 插值的广东省近 50 年日照时数时空特征[J]. 广东气象, 2022, 44(1): 25–29.