

# 基于高分辨率资料同化数据对青藏高原极端低温特征分析

吴雪娜, 赵磊\*, 文小航

成都信息工程大学, 四川 成都

收稿日期: 2022年10月13日; 录用日期: 2022年11月22日; 发布日期: 2022年11月29日

## 摘要

为进一步研究青藏高原极端低温事件的影响, 本文利用WRF模式输出的2015~2020年的逐小时气温高分辨率同化数据计算了两类极端气温指数, 研究了其空间分布规律, 并根据指数分布规律将青藏高原分为四个区域, 研究了高原极端低温的区域特征。结果表明: 1) 高原整体呈现出东暖西冷的特征, 气温以昆仑山脉与塔里木盆地的交界地带为低值中心, 向四周逐渐增暖, 霜冻日数和冰封日数也逐步减少。2) 以藏北为主的一区气温最低, 以川西为主的四区气温最高, 而以青海为主的二区和以藏南为主的三区气温最接近, 一区和二区为年内气温变化最为剧烈的两个区域。四个区域霜冻与冰封日数的分布规律与气温相对应, 一区最多, 三区次之, 二区较少, 四区最少。3) 四个区域霜冻和冰封日数的季节变化相一致, 冬季最多, 春季次之, 秋季较少, 夏季最少。对霜冻日数而言, 冬季, 不同区域间日数的差异最小; 温度越高的区域, 霜冻日数的季节差异越明显; 冰封日数与霜冻日数相反。

## 关键词

极端气温指数, 青藏高原, 资料同化数据, 霜冻

# Analysis of Extreme Low Temperature Characteristics on the Qinghai-Tibet Plateau Based on High-Resolution Assimilation Dataset

Xuena Wu, Lei Zhao\*, Xiaohang Wen

Chengdu University of Information Technology, Chengdu Sichuan

Received: Oct. 13<sup>th</sup>, 2022; accepted: Nov. 22<sup>nd</sup>, 2022; published: Nov. 29<sup>th</sup>, 2022

\*通讯作者。

文章引用: 吴雪娜, 赵磊, 文小航. 基于高分辨率资料同化数据对青藏高原极端低温特征分析[J]. 地球科学前沿, 2022, 12(11): 1446-1455. DOI: 10.12677/ag.2022.1211141

## Abstract

In order to further study the impact of extreme low temperature events on the Qinghai-Tibet Plateau, this paper calculated two types of extreme temperature indices based on the hourly temperature data of WRF reanalysis data from 2015 to 2020, and studied their spatial distribution law. According to the exponential distribution law, the Qinghai-Tibet Plateau was divided into four regions, and the regional characteristics of extreme low temperature on the plateau were studied. Major results are as follows: 1) The plateau as a whole is characterized by warmth in the east and coldness in the west, with temperatures centred on the junction of the Kunlun Mountains and the Tarim Basin as the centre of low values and gradually warming in all directions, with a gradual decrease in the number of frost and freezing days. 2) The lowest temperatures were found in Zone 1, mainly in northern Tibet, and the highest in Zone 4, mainly in western Sichuan, while Zone 2, mainly in Qinghai, and Zone 3, mainly in southern Tibet, were the closest, with Zone 1 and Zone 2 being the two regions with the most drastic temperature changes during the year. The distribution pattern of the number of frost and freezing days in the four regions corresponds to the temperature, with Zone 1 having the most, followed by Zone 3, Zone 2 having less and Zone 4 having the least. 3) The seasonal variation in the number of frost and freeze days is consistent across the four regions, with the highest number in winter, followed by spring, less in autumn and the lowest in summer. For the number of frost days, in winter, the differences in the number of days between regions were minimal; the higher the temperature, the more pronounced the seasonal difference in the number of frost days; and the opposite of frost days for the number of freezing days.

## Keywords

Extreme Temperature Indices, Tibet Plateau, Assimilation Dataset, Frost

Copyright © 2022 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

近年来,一些研究表明全球变暖的问题已经变得更加明显:2007年2月发表的联合国政府间气候变化专门委员会(IPCC)第四次评估报告指出,在过去100年里,全球平均气温上升了 $0.74^{\circ}\text{C}$ ,在过去50年里,全球气温以 $0.13^{\circ}\text{C}$ 每10年的速度升高。全球气候变暖导致的极端气候事件异常频繁,已成为国际和国内学者关注的焦点。科研工作者们针对中国极端低温事件的研究也日益增多[1][2]。王晓娟等[1]研究发现区域性极端低温事件指标的最低气温、几何中心纬度频率分布具有双峰性。刘明歆等[3]将极端低温事件分为两种类型:大范围持续低温事件(EPECE)和一般的寒潮事件(CWE)。结果显示CWE的持续时间为3~5天,在此过程中气温下降较快,而后气温升高也较快;而EPECE的持续时间则在15天以上,相较于另一个过程,此过程降温幅度和范围都更大。韩永秋等[4]发现近51年来,我国冬半年极端低温事件总体呈明显的减少趋势,但仍存在明显的时空差异,且我国冬半年极端低温事件频数与东亚冬季风指数存在很好的相关性。索朗塔杰等[5]重点分析了我国冬季极端低温指数的年代际变化特征,发现长江以北地区、新疆北部以及青藏高原东部地区的台站呈现出明显年代际变化。

WRF模式的开发是1997年由美国国家大气研究中心中小尺度气象处、NCEP的环境模拟中心、预报系统实验室的预报研究处和俄克拉荷马大学的风暴分析预报中心四家单位联合发起,由美国国家自然

科学基金和美国国家海洋和大气管理局共同支持,是一种完全可压非静力模式,采用 Arakawa C 网格,集数值天气预报、大气模拟及数据同化于一体的模式系统,能够很好地改善中小尺度天气的模拟和预报[6]。WRF 模式于 2000 年推出第一版本,此后多次改进版本,2004 年发布的第二版 WRF V2.0 包含了单重和双重嵌套,并引入了基于三维变分的资料同化系统。2011 年推出的 WRF V3.3 中,更新了四维变分的资料同化系统。我国有学者将 WRF 模式运用于对极端低温天气及气温变化的评估。如肖林鸿等[7]研究发现以耦合陆面模式 Noah-MP 为基础的区域气候模式 WRF 能很好地反映青藏高原地区极端温度指数的空间特征,但模拟的温度与实际温度相比较低。马奕等[8]基于 CN05 格点资料及观测站资料,发现 WRF 模式与 CN05 资料多年年平均温度数据具有相似的空间格局,但是 WRF 模型的空间格局更为精细。王树舟等[9]研究发现 MIROC 模式和 WRF 模式都能够很好地反映中国的年平均温度分布,但 WRF 模式相较于 MIRPOC 则更精细,其对四川盆地高温,我国北部的低温以及年平均气温模拟能力都有一定改善。陈春艳等[10]分析了 WRF 模式不同辐射参数化方案对极端低温天气预报的影响,发现 WRF 模式不同的辐射方案,尤其是长波辐射方案对极端低温天气预报的影响较大。

对于本文所研究的区域——青藏高原,也有学者对其极端气温展开了相关的研究工作。罗忠红等[11]指出 1961~2008 年东北、西北、青藏高原等地理位置偏北和高海拔地区、长江以南地区易发生长时间(5 天以上)极端低温事件。蒋卓亚[12]发现,除了青藏高原以外中国大多数区域都在升温,极端热事件的概率由南到北依次递减,赣闽、新疆吐鲁番等地出现了极端高温,而在东北、青藏高原以及新疆阿尔泰山地区易出现极端低温。而青藏高原的区域持续性低温事件主要集中发生在全球气候变暖前,低温事件发生主要集中在高原大部分区域农业区[13]。陈锐杰等[14]发现极端低温事件频繁出现的地点以高原北部为主,而极端低温事件的强度则以高原南部更强,并且极端低温事件的频次和强度都有下降的趋势。

青藏高原因其独特的地理条件,相对于其它区域而言温度偏低,是我国极端低温天气的高发区域。因而在全球变暖的大环境下研究该地区极端低温事件的分布特征和季节特征便显得十分有必要,本文利用 WRF 再分析数据的逐小时气温资料计算了两类极端气温指数,并根据指数的分布规律将青藏高原分区,以此来完成对青藏高原地区极端低温灾害的研究。通过本研究,以期对近年来青藏高原地区的极端低温气候有进一步了解,可以根据实际情况因地制宜制定防灾计划,加强建设对极端气温事件的防御能力,为今后该区降低气象灾害,提高气象服务水平等方面提供重要的理论依据,同时提高防灾,减灾,抗灾能力。

## 2. 资料和方法

### 2.1. 资料概况

本研究主要是对青藏高原地区近年来的极端低温气候分布特征以及带来的灾害进行分析。由于高原的自然环境恶劣,气象站数量稀少,气象数据十分缺乏;而这些观测站大多位于距离城镇较近的山谷和平原地带,便于收集和收集资料,如果仅靠台站的数据进行空间插值,就会造成很大的误差,甚至会遮蔽某些空间信息,因此,从理论上来说,这些观测站所得到的气象资料并不能完全反映出高原真实温度的空间分布。基于此,本文采用的数据有:2015~2020 年逐小时的 WRF 再分析数据,根据极端气温指数的定义计算相应指数,分析极端低温的分布规律。该数据所研究区域的经度范围为:东经  $73^{\circ}19' \sim 104^{\circ}47'$ ,纬度范围为:北纬  $26^{\circ}00' \sim 39^{\circ}47'$ 。数据的时间分辨率为:1 h;空间分辨率为:5 km。

### 2.2. 研究方法

WMO (World Meteorological Organization) 气候委员会等组织联合成立了气候变化监测和指标专家组 (ETCCDI, Expert Team on Climate Change Detection and Indices),并定义了 27 个典型的气候指数,其中包

括 11 个极端降水指数和 16 个极端气温指数。极端温度指数可以分为极端冷指数和极端暖指数两种类型 [15]，因为本文旨在研究青藏高原极端低温事件及其影响，因而在 ETCCDMI 推荐的 27 项指数中，着重选取了除“极端最高温度”以外与最低温度相关的 3 种极端气温指数，即以年内最高温度的极大值来定义的“极端最高温度”；以年内最低温度的极大值来定义的“极端最低温度”；以一年中日最低温度小于 0℃ 的日数来定义的“霜冻日数”；还有以一年中日最高温度小于 0℃ 的日数来定义的“冰封日数” (表 1)。这些指数的定义不仅适用于年尺度的研究，还可以推广至季、月尺度的研究，利用这些指数，可以够客观真实的反映极端气温各个方面的变化状况。

**Table 1.** Definition of extreme temperature index over Qinghai-Tibet Plateau  
**表 1.** 青藏高原极端气温指数定义

| 类型   | 代码  | 名称     | 指数定义                  |
|------|-----|--------|-----------------------|
| 极值指数 | TXx | 极端最高温度 | 年内日最高温度的最大值(℃)        |
|      | TNx | 极端最低温度 | 年内日最低温度的最小值(℃)        |
| 绝对指数 | FD  | 霜冻日数   | 一年中日最低温度 < 0℃ 的日数天(d) |
|      | ID  | 冰封日数   | 一年中日最高温度 < 0℃ 的日数天(d) |

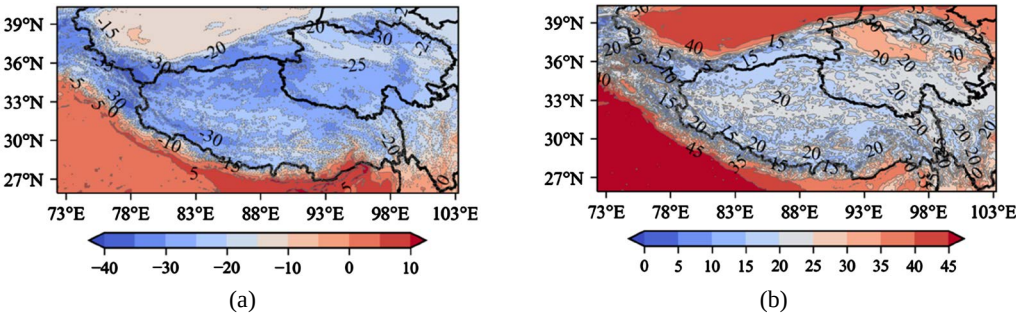
本文利用 WRF 再分析数据的逐小时气温资料计算两类极端气温指数，首先分析研究了青藏高原空间分布规律，然后根据指数的空间分布规律将青藏高原分为四个区域，研究了高原极端低温的区域特征及其差异，并根据霜冻日数和冰封日数的讨论其季节变化差异。

3. 研究结果

3.1. 极端低温指数空间分布特征

3.1.1. 极值指数分布规律

从极端最低气温的分布特征图(图 1(a))可以看出高原极端最低气温范围大约为-30℃~-15℃，整体形势呈现出东部温度高西部温度低的分布特点，以昆仑山脉与塔里木盆地的交界地带为气温最低处，向四周温度逐渐上升。从高原整体来看，极端最低气温的最小值出现在西藏西北部，新疆西南部以及西藏东南部的冈底斯山脉附近，气温值大约为-30℃；气温较大值出现在柴达木盆地附近，气温值大约为-15℃；气温最大值出现在四川的西部，在此区域，存在部分地方的气温大于-10℃。对比青海省和西藏，可以明显看出，西藏的极端最低气温要小于青海省，这表明西藏日最低气温的最小值要明显小于青海省，可以很好地反映出高原东暖西冷的空间特征。



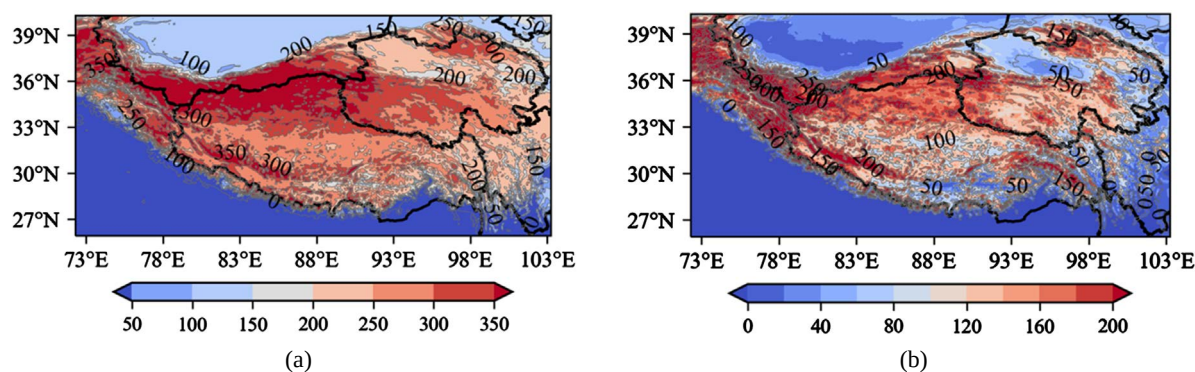
**Figure 1.** Extreme minimum temperature (a) and extreme maximum temperature (b) over the Qinghai-Tibet Plateau during 2015~2020  
**图 1.** 青藏高原 2015~2020 年极端最低气温(a)和极端最高气温(b)



从极端最高气温的分布特征图(图 1(b))可以看出,高原极端最高气温的空间分布特征与极端最低气温的空间分布特征大体上是相同,即高原总体气温为东暖西冷。极端高温数值的范围大约为  $15^{\circ}\text{C}\sim 30^{\circ}\text{C}$ ,气温的极大值区位于青海省的柴达木盆地和四川西部,大约为  $30^{\circ}\text{C}$ ;气温的极小值区位于西藏西部和新疆西南部,约为  $15^{\circ}\text{C}$ 。青海省的极端最高温度要高于西藏,但除了柴达木盆地外,青海的大部分地区极端最高气温也仅在  $20^{\circ}\text{C}$  左右,西藏整体的极端最高气温都在  $15^{\circ}\text{C}\sim 20^{\circ}\text{C}$ 。

### 3.1.2. 绝对指数分布规律

由年均霜冻日数的分布特征图(图 2(a))可以看出:青藏高原年均霜冻日数较高,绝大部分地区日数超过了 200 天,从整体来看,高原的霜冻日数分布不均匀,呈现出了西北高,东北低的分布形势,数值从昆仑山脉与塔里木盆地的交界处开始向四周区域逐渐递减,这与前文的极端最低气温的分布特征较为一致;其中西藏的西北部、新疆西南部以及冈底斯山脉附近的霜冻日数最高,达到了 350 d,这表明这些地区几乎全年的日最低气温都小于  $0^{\circ}\text{C}$ ,青藏高原腹部地区的霜冻日数次之,大约处在 200 d~250 d 之间,西藏东南部,四川西以及部青海省的部分地区的霜冻日数最少,要低于 150 d,西藏地区的霜冻日数呈由北向南,由西向东逐渐递减的态势;青海省的整体霜冻日数小于西藏,柴达木盆地的霜冻日数最少。



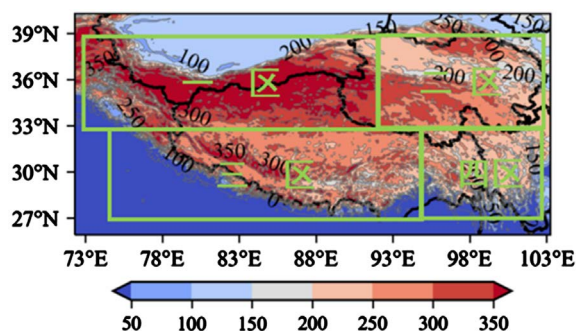
**Figure 2.** Average annual number of frost days (a) and ice-locked days (b) over the Qinghai-Tibet plateau during 2015~2020  
**图 2.** 青藏高原 2015~2020 年年均霜冻日数(a)和冰封日数(b)

从年均冰封日数的分布特征图(图 2(b))可以看出:青藏高原年均冰封日数的空间分布与霜冻日数的空间分布基本吻合,也呈现出从呈现西北高,东北低的分布形势,整体分布形势从昆仑山脉与塔里木盆地的交界处向四周区域递减,但从图中可以看出,冰封日数总体要明显少于霜冻日数,其中西藏的西北部、新疆西南部以及冈底斯山脉附近的冰封日数最高,超过了 200 d;青藏高原腹部地区的冰封日数次之,大约为 120 d 左右;西藏南部及青海省部分地区的冰封日数仅为 20 d,是青藏高原冰封日数最少的区域。西藏冰封日数与霜降日数的空间场分布基本吻合,呈由北向南,由西向东逐渐递减的态势;在青海省柴达木盆地是冰封日数最小的区域,其分布与霜冻日数的一致。

## 3.2. 气温与极端温度指数分区特征

### 3.2.1. 区域气温变化与指数年变化特征

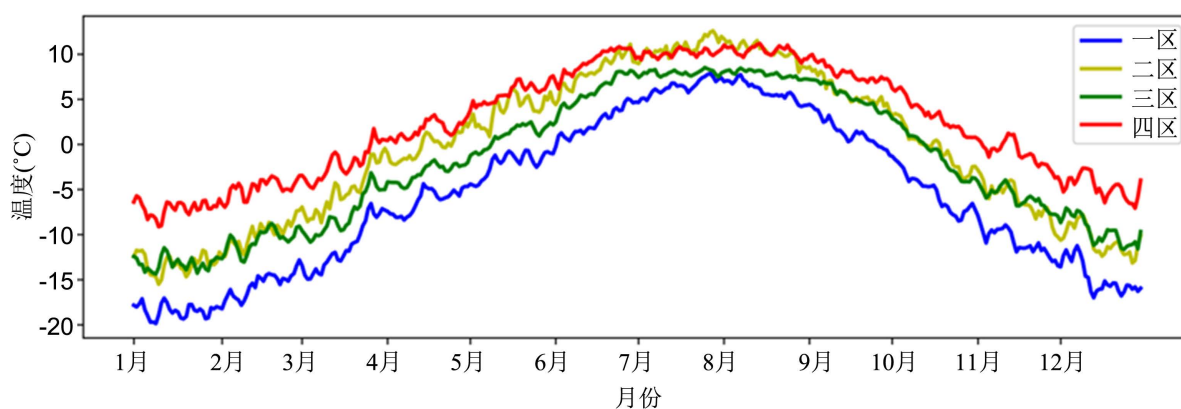
根据各类极端气温指数的空间分布图,我们可以发现,青藏高原的气温变化有明显的区域特征,根据指数的分布特征,本研究将高原大致上分为四个区域(图 3),将以西藏北部和新疆南部为主的区域定义为一区(范围为  $33^{\circ}\text{N}\sim 39^{\circ}\text{N}$ ;  $73^{\circ}\text{E}\sim 92^{\circ}\text{E}$ );以青海为主的区域定义为二区(范围为  $33^{\circ}\text{N}\sim 39^{\circ}\text{N}$ ;  $92^{\circ}\text{E}\sim 103^{\circ}\text{E}$ );以西藏南部为主的区域定义为三区(范围为  $27^{\circ}\text{N}\sim 33^{\circ}\text{N}$ ;  $78^{\circ}\text{E}\sim 95^{\circ}\text{E}$ ),以四川西部为主的区域定义为四区(范围为  $27^{\circ}\text{N}\sim 33^{\circ}\text{N}$ ;  $95^{\circ}\text{E}\sim 103^{\circ}\text{E}$ ),分别研究四个区域的气温和指数变化并进行比较。



**Figure 3.** Partition diagram of Qinghai-Tibet plateau (Taking the distribution characteristics of frost days as an example)  
**图 3.** 青藏高原分区示意图(以霜冻日数分布特征的为例)

从每日平均气温变化的折线图我们可以看出：从整体来看，四个区域气温的年内日平均气温都呈现出一致的先上升后下降的趋势，一月的平均气温最低；七月的平均气温最高。其中，一区 and 四区日平均气温差异最大，冬季气温差约为 15℃，夏季约为 5℃；二区和三区是四个区域内差异最小的两个区域，秋季和冬季这两个区域没有明显气温差，夏季气温差最大，可达到 5℃。

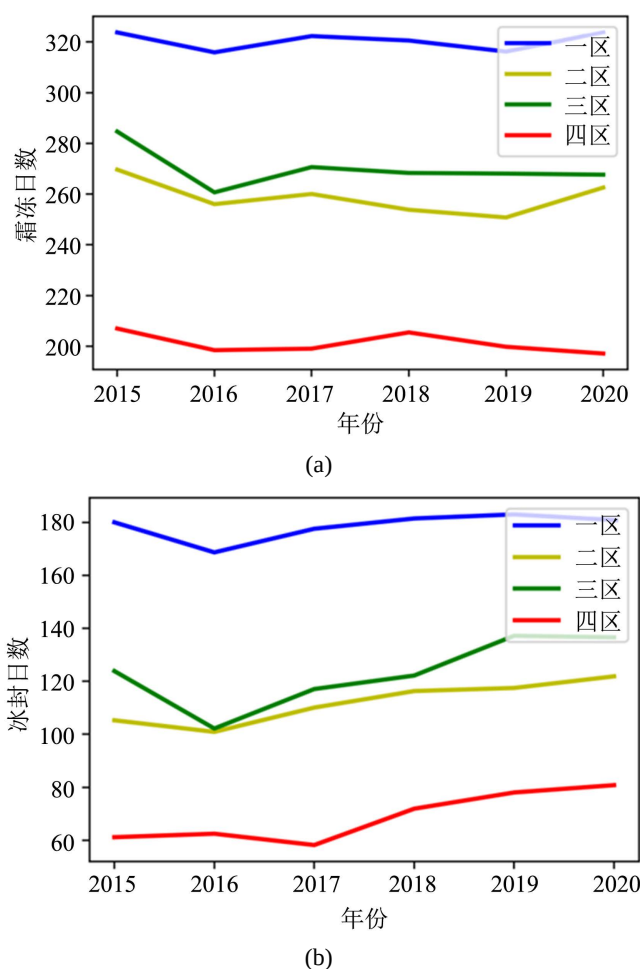
分别从四个区域来看，一区的气温始终低于其他三个区域，一月为最冷月，平均气温略高于 -20℃，七月为最暖月，平均气温略低于 5℃，气温差约为 25℃，且除了夏季日平均气温高于 0℃外，其他三个季节的日平均气温都低于 0℃，是青藏高原最冷的区域，这与极端指数的空间分布特征相一致，即在此区域内，极端最低气温和极端最高气温都最小，且霜冻日数和冰封日数最高；三区的日平均气温仅高于一区，此区域一月的平均气温略高于 -15℃，七月的平均气温约为 5℃，全年气温差可到 20℃，是青藏高原第二冷的地区，二区秋季和冬季日平均气温与三区相似，但夏季七月为整个青藏高原日平均气温最高的区域，气温值约为 10℃，全年气温差可达到 25℃，二区和三区 5 到 10 月的日平均气温高于 0℃，其他月份的日平均气温都低于 0℃；四区气温除七月外，其他月份的日平均气温都高于剩余三个区域，一月的日平均气温在 -10℃~-5℃之间，七月的日平均气温在 5℃~10℃，气温差约为 15℃，此区域为高原上平均气温最高，气温差异最小的区域，这与之前的研究结果相一致，即此区域为霜冻日数和冰封日数最少的区域(图 4)。



**Figure 4.** Average daily temperature changes in four regions of the Qinghai-Tibet plateau from 2015 to 2020  
**图 4.** 青藏高原四个区域 2015~2020 年日均气温变化

从四个区域霜冻日数的年变化折线图(图 5(a))我们可以看出，霜冻日数的分布规律与上文的日平均气温变化相对应，最冷的一区连续六年霜冻日数都超过了 310 d，在 2016 年和 2019 年霜冻日数较少，约为

310 d, 在剩余年份霜冻日数较多, 约为 325 d; 二区六年间霜冻日数的变化范围在 250~270 d 之间, 是霜冻日数第三多的区域, 2019 年二区的霜冻日数最少, 约为 250 d, 2015 年霜冻日数最多, 略小于 270 d; 三区是四个区域内霜冻日数第二多的区域, 其霜冻日数的变化范围在 260~285 d 之间, 2016 年为霜冻日数最少的年份, 大约为 260 d, 2015 年为霜冻日数最多的年份, 大约为 285 d, 且在 2017~2020 四年间, 三区的霜冻日数几乎没有变化, 稳定维持在 270 d 左右; 四区为青藏高原最暖的区域, 六年间霜冻日数都要明显低于其他三个区域, 2016 和 2020 年霜冻日数较少, 略低于 200 d, 2015 年和 2018 年霜冻日数较多, 约为 210 d。且从总体来看, 四个区域六年间的霜冻日数变化都不大, 普遍在 2016 年霜冻日数偏多, 在 2015 年霜冻日数偏少。



**Figure 5.** Annual changes of frost days (a) and ice days (b) in the Qinghai-Tibet plateau from 2015 to 2020

**图 5.** 青藏高原区域 2015~2020 年霜冻日数(a)和冰封日数(b)年变化

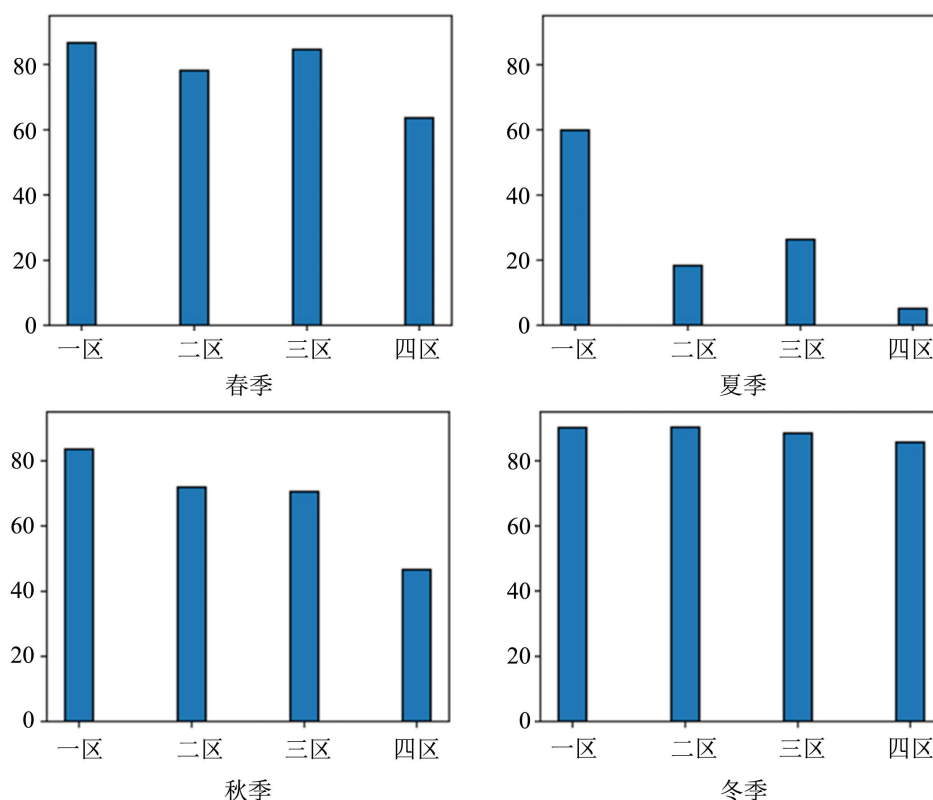
从四个区域冰封日数的年变化折线图(图 5(b))可以看出, 冰封日数与霜冻日数的年变化规律相似, 即在 2016 年, 四个区域的冰封日数都较少, 同时从右图我们也可以看出, 在 2017~2020 四年间, 四个区域的冰封日数都呈现出上升的趋势, 在 2020 年冰封日数达到最大。分别从四个区域来看, 一区连续六年冰封日数都超过了 170 d, 在 2016 年冰封日数略低于 170 d, 在 2020 年日数约为 180 d; 二区冰封日数的变化范围在 100~120 d 之间, 该区域在 2016 年冰封日数略高于 100 d, 2020 年冰封日数约为 140 d; 三区六年间冰封日数的变化范围在 100~140 d 之间, 是四个区域中冰封日数变化范围最大的区域, 2016 年冰封

日数与二区相同，略高于 100 d，2020 年冰封日数约为 140 d；四区为青藏高原最暖的区域，与霜冻日数一样，六年间冰封日数都要明显低于其他三个区域，该区域在 2017 年冰封日数最少约为 60 d，2020 年冰封日数最多，约为 80 d。

### 3.2.2. 区域极端温度指数季节特征

从四个区域的霜冻日数季节柱状统计图我们可以看出，四个区域霜冻日数的季节变化相一致，冬季最多，春季次之，秋季较少，夏季最少，四个区域的霜冻日数在冬季差异最小，各个区域均无明显差别；夏季霜冻日数区域间差别最大，霜冻日数最高的一区和霜冻日数最低的四区的差异大约为 55 d 左右，秋季与冬季区域之间存在差别，主要体现在一区 and 四区的霜冻日数上，春季，这两个区域差了 20 d，秋季差了 30 d，而二区和三区差异并不明显。

从四个区域分别来看，一区的霜冻日数全年都很高，季节变化不明显，最冷季与最热季的日数差异大约为 30 d，除夏季在 60 d 左右，其余三个季节的霜冻日数都超过了 80 d；二区春秋冬三个季节的霜冻日数差异不明显，都超过了 70 d，夏季霜冻日数明显下降，仅有 20 d 左右，最冷的冬季与最暖的夏季霜冻日数差很大，大约为 70 d；三区霜冻日数的季节变化与二区相似，即春秋冬三个季节的日数都很高，超过了 70 d，夏季霜冻日数很低但高于二区和四区，大约为 30 d；四区霜冻日数是季节差异最明显的一个区域，冬季大约为 80 d，春季为 60 d 左右，秋季为 40 d 左右，到了夏季只有不到 10 d，且四区全年都为青藏高原地区霜冻日数最低的区域，这与之前的气温变化曲线相一致，即四区一直为青藏高原的较暖区域。一区霜冻日数最高，日数的季节变化最不明显，四区霜冻日数最低，季节变化最明显，说明温度越高的区域，霜冻日数的季节差异越明显(图 6)。

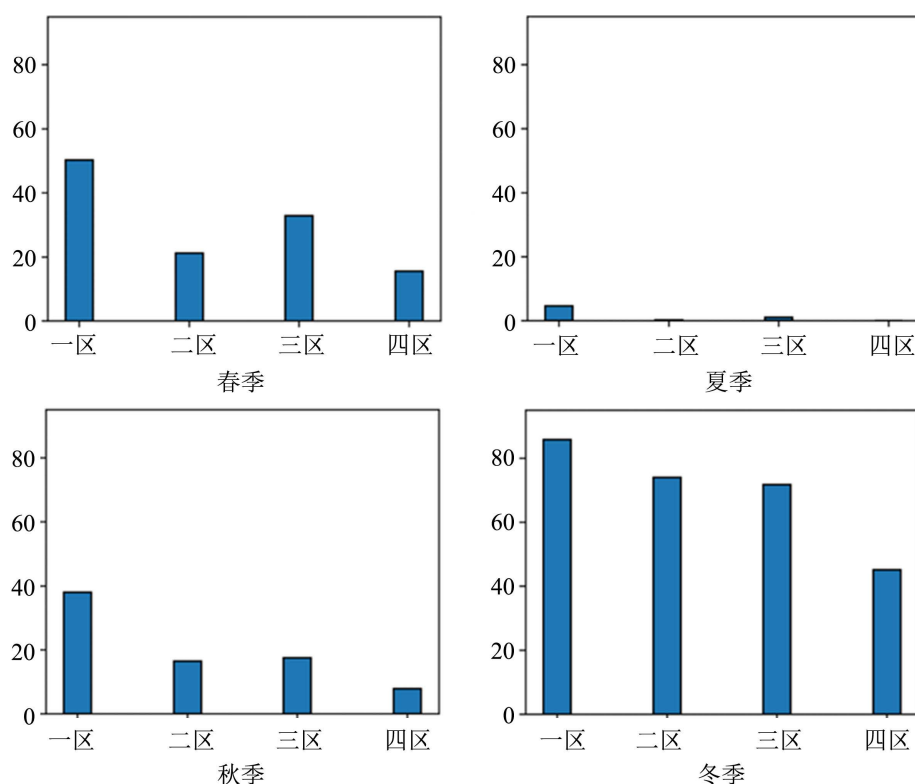


**Figure 6.** Seasonal histogram of frost days in four regions of the Qinghai-Tibet plateau from 2015 to 2020  
**图 6.** 青藏高原四个区域 2015~2020 年霜冻日数季节柱状统计图



从四个区域的冰封日数季节柱状统计图可以看出, 冰封日数的季节变化与霜冻日数一致, 即冬季最多, 夏季最少, 但冰封日数区域之间的差异较为明显, 除了夏季, 四个区域都几乎不存在冰封日数, 其他三个季节, 区域间的冰封日数都存在一定差异: 春季, 最冷的一区冰封日数为 50 d 左右, 最暖的四区冰封日数低于 20 d, 两个区域之间差了 30 d 左右; 夏季, 仅在一区存在少数的冰封日 在其他区域冰封日为 0; 秋季, 二区和三区冰封日数差异不大, 一区冰封日为 40 d 左右, 四区为 10 左右, 两区域之间差了 30 d; 冬季, 不同于霜冻日数, 冰封日数在冬季也存在区域之间的差异, 一二三区的日数均在 70 d 之上, 但四区日数仅有 40 d 左右, 明显低于其他三个区域。

分别从四个区域来看, 一区做为高原最冷的区域, 冬季冰封日数约为 90 d, 夏季仅为 10 d, 季节差异明显, 两个季节差了 80 d; 二区和三区, 冬季冰封日数均为 70 d 左右, 夏季几乎没有冰封日数, 两个季节差了 70 d; 四区为高原最暖的区域, 冬季冰封日约为 50 d, 夏季无冰封日, 两个季节差了 50 d。我们可以看出, 温度越低的区域, 冰封日数的季节差异越明显, 最高可以达到 80 d 左右(图 7)。



**Figure 7.** Seasonal histogram of ice-capped days in four regions of the Qinghai-Tibet plateau from 2015 to 2020  
**图 7.** 青藏高原四个区域 2015~2020 年冰封日数季节柱状统计图

#### 4. 结论

本文利用 WRF 再分析数据的逐小时气温资料计算了两类极端气温指数, 研究了其时空分布规律, 并根据指数的分布规律将青藏高原分为四个区域, 研究了高原极端低温的区域特征。得出了如下结论:

1) 青藏高原极端气温指数的空间分布显示, 高原整体呈现东暖西冷的总体特征, 气温以昆仑山脉与塔里木盆地的交界地带为低值中心, 向四周逐渐增暖。青藏高原区域日均气温变化显示, 以藏北为主的一区气温最低, 以川西为主的四区气温最高, 而以青海为主的二区和以藏南为主的三区气温最接近; 一区和二区最暖月和最冷月的气温差异可以达到 25℃。

2) 青藏高原区域的六年变化曲线显示, 霜冻日数与冰封日数的分布规律与气温相对应, 一区最多, 三区次之, 二区较少, 四区最少, 且霜冻和冰封日数在 2016 年都较少, 在 2017~2020 四年间, 四个区域的冰封日数都呈现出上升的趋势。

3) 青藏高原区域霜冻和冰封日数的季节统计显示, 四个区域霜冻和冰封日数的季节变化相一致, 冬季最多, 春季次之, 秋季较少, 夏季最少。霜冻日数在冬季区域间差异最小, 温度越高的区域, 霜冻日数的季节差异越明显。冰封日数与霜冻日数相反, 在夏季区域间差异最小, 温度越低的区域, 冰封日数的季节差异越明显。

## 基金项目

四川省科技计划项目(2022YFS0536)资助。

## 参考文献

- [1] 王晓娟, 龚志强, 任福民, 等. 1960-2009 年中国冬季区域性极端低温事件的时空特征[J]. 气候变化研究进展, 2012, 8(1): 8-15.
- [2] Yan, Z., Jones, P.D., Davies, T.D., et al. (2002) Trends of Extreme Temperatures in Europe and China Based on Daily Observations. *Climatic Change*, 53, 355-392. <https://doi.org/10.1023/A:1014939413284>
- [3] 刘明歆, 李艳, 吕春艳. 中国冬季两类极端低温事件特征及其大气环流成因分析[J]. 高原气象, 2021, 40(3): 603-620.
- [4] 韩永秋, 周连童, 黄荣辉. 中国冬半年极端低温事件的时空特征及其与东亚冬季风的关系[J]. 气候与环境研究, 2021, 26(1): 1-17.
- [5] 索朗塔杰, 施宁, 王艺橙, 等. 我国冬季极端低温指数的年代际变化特征[J]. 大气科学, 2020, 44(5): 1125-1140.
- [6] 王晓君, 马浩. 新一代中尺度预报模式(WRF)国内应用进展[J]. 地球科学进展, 2011, 26(11): 1191-1199.
- [7] 肖林鸿, 高艳红, Chen Fei, 等. 青藏高原极端气温的动力降尺度模拟[J]. 高原气象, 2016, 35(3): 574-589.
- [8] 马奕, 白磊, 李倩, 等. 区域气候模式在中国西北地区气温和降水长时间序列模拟的误差分析[J]. 冰川冻土, 2016, 38(1): 77-88.
- [9] 王树舟, 于恩涛. 基于 MIROC/WRF 嵌套模式的中国气候降尺度模拟[J]. 气候与环境研究, 2013, 18(6): 681-692.
- [10] 陈春艳, 黄海波. WRF 模式辐射方案对极端低温天气预报的影响[J]. 干旱区研究, 2016, 33(4): 718-723.
- [11] 罗忠红, 黄嘉佑, 江航东. 我国冬季持续极端低温分布特征[J]. 安徽农业科学, 2011, 39(24): 14945-14947.
- [12] 蒋卓亚. 中国极端气温及降水事件的时空特征研究[D]: [博士学位论文]. 上海: 华东师范大学, 2017.
- [13] 张调风, 杨昭明, 温婷婷, 等. 青藏高原东北部区域持续性低温事件的特征及影响因子分析[J]. 干旱区地理, 2021, 44(4): 897-905.
- [14] 陈锐杰, 刘峰贵, 陈琼, 等. 近 60 年青藏高原东北缘极端气温事件与气温日较差分析——以西宁地区为例[J]. 高原气象, 2018, 37(5): 1188-1198.
- [15] 翟盘茂, 刘静. 气候变暖背景下的极端天气气候事件与防灾减灾[J]. 中国工程科学, 2012, 14(9): 55-63+84.