

黑龙江流域中俄跨境地区 $0.25^{\circ}\times 0.25^{\circ}$ 有效积温数据集 (2002–2020)

周业智^{1,2}, 王卷乐^{1,3*}, 李凯^{1,2}, Grigorieva, E. A.⁴

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. 中国矿业大学(北京)地球科学与测绘工程学院, 北京 100083;
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. 俄罗斯科学院区域问题复杂分析研究所远东地区分所, 比罗比詹 679016

摘要: 作者以黑龙江流域中俄跨境地区为研究区, 以 0、5、10 和 15 °C 为基础温度, 基于大气再分析数据产品 ECMWF Re-Analysis 5 中的逐小时 2 m 气温数据, 通过时空筛选与尺度转换、有效温度始末日期甄别, 以及区间数据批量统计等步骤, 得到黑龙江流域中俄跨境地区 $0.25^{\circ}\times 0.25^{\circ}$ 有效积温数据集 (2002–2020)。将本数据产品 (有效积温) 与基于气象实测数据及其关联产品的有效积温进行相关性分析表明, 本产品与两者均呈正相关关系, 并且年际间波动情况基本一致。本数据集内容包括: (1) 研究区边界数据; (2) 研究区 2002–2020 逐年 $0.25^{\circ}\times 0.25^{\circ}$ 有效温度 (≥ 0 、 ≥ 5 、 ≥ 10 和 $\geq 15^{\circ}\text{C}$) 始末时间数据; (3) 研究区 2002–2020 逐年 $0.25^{\circ}\times 0.25^{\circ}$ 有效积温 (≥ 0 、 ≥ 5 、 ≥ 10 和 $\geq 15^{\circ}\text{C}$) 数据; (4) 有效积温的验证数据。数据集存储为 .shp、.tif 和 .xlsx 格式, 由 305 个文件组成, 数据量为 19.9 MB (压缩为 1 个文件, 1.69 MB)。

关键词: 黑龙江流域; 中俄跨境地区; 有效温度始末日期; 有效积温; 2002–2020

DOI: <https://doi.org/10.3974/geodp.2022.03.18>

CSTR: <https://cstr.science.org.cn/CSTR:20146.14.2022.03.18>

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.2022.04.05.V1> 或 <https://cstr.science.org.cn/CSTR:20146.11.2022.04.05.V1>.

1 前言

长期以来, 农业生产的进程受到多种自然气候环境条件的影响, 其中气温是作物发育的关键因素, 其发生的任何变化都会影响地区气候资源的供热条件。气温与太阳辐射、光照周期和土壤温度等变量直接或间接相关, 同时对作物光合作用过程起主导作用, 所以气温也

收稿日期: 2022-04-26; 修订日期: 2022-08-22; 出版日期: 2022-09-25

基金项目: 中国科学院 (XDA2003020302); 中国工程科技知识中心防灾减灾知识服务系统 (CKCEST-2022-1-41)

*通讯作者: 王卷乐 0000-0002-5641-0813, 中国科学院地理科学与资源研究所, wangjl@igsrr.ac.cn

数据引用方式: [1] 周业智, 王卷乐, 李凯等. 黑龙江流域中俄跨境地区 $0.25^{\circ}\times 0.25^{\circ}$ 有效积温数据集 (2002–2020)

[J]. 全球变化数据学报, 2022, 6(3): 467–478. <https://doi.org/10.3974/geodp.2022.03.18>.
<https://cstr.science.org.cn/CSTR:20146.14.2022.03.18>.

[2] 周业智, 王卷乐, 李凯等. 黑龙江流域中俄跨境地区 $0.25^{\circ}\times 0.25^{\circ}$ 有效积温数据集 (2002–2020) [J/DB/OL]. 全球变化数据仓储杂志, 2022. <https://doi.org/10.3974/geodb.2022.04.05.V1>.
<https://cstr.science.org.cn/CSTR:20146.11.2022.04.05.V1>.

是影响作物生产力和质量的重要变量之一。除此之外,温度变化及其波动效应对农田生态系统研究也起到重要支撑作用,因其在影响农业资源供热变化的同时,还会导致火灾、霜冻、干旱等短时或持续性次生灾害发生,对整个生态系统的可持续性产生较大影响^[1,2]。

逐日气温的累积效应是作物生长和生产潜力的一个重要指标^[3]。大约 300 年前, de Réaumur 提出了植物生长发育所需的蓄热统计理念,并由此产生一系列基于气温的评价指数来辅助对于各区域农业进行科学管理^[4,5]。上述指数旨在将历史温度数据进行统计分析,以帮助人们了解各地区作物生长条件的差异,代表性方法包括平均生长季节温度、Huglin 光热指数、活动累积温度和有效积温等方法。其中平均生长季节温度是将某一地区生长季内(北半球设为每年 4–10 月,南半球设为 10 月至下一年 4 月)的温度进行平均,进而形成对于当地农业气候适宜性的宏观认识^[6]。Huglin 光热指数是以 10 °C 气温为基准评估葡萄种植栽培和酿酒所需的气候条件^[7]。而活动累积温度是指日平均气温高于一定温度阈值(通常为 10 °C)的期间内高于零度气温的年累积总和,该指标较为直观地表征了某地的总体热量资源,因此其对于农业气候分析和区划等研究工作具有重要意义^[8,9]。而有效积温法基于植物生长季节热量积累的理念,描述了高于生物学零度的日期内适宜其生长发育的日平均气温与其差值的年度累积情况,其中生物学零度代表了植物开始生长发育的最低要求^[10]。在以上各种表示热量累积的评价方法中,有效积温法去除了地区热量资源中不适于作物生长的“无效”部分,进一步修正了两者间的线性关系,因此可用于监测作物生长条件的时空演变过程以及预测其未来生育时段,并可根据不同作物的生长温度阈值将相应的气温范围纳入区域乃至全球热势能的研究中,因而被广泛使用^[11,12]。

黑龙江流域是横跨中国、俄罗斯、蒙古和朝鲜四国的一个跨境流域,其中位于黑龙江-乌苏里江沿线的中俄边境毗邻地区包含黑龙江省、阿穆尔州、犹太自治州以及滨海边疆区等行政单元(图 1)。作为全流域的主要农业产区,该地自然资源储量较高、地理及气候条件总体良好,具有深厚的农业资源发展潜力。黑龙江省为温带大陆性季风气候,近年来平均气温为 4 °C 左右,平均降水量范围介于 530–760 mm 之间,各类气象条件具有鲜明的季节性特征^[13]。就其地理条件而言,松嫩与三江两大平原区位于全省东西两侧,内部土壤质量肥沃,适宜种植大豆、水稻、玉米、马铃薯等农作物。而受制于寒冷气温和永久冻土层等环境本底影响,俄罗斯远东区种植业主要集中于自然条件较好的南部和东部行政区,这些地区兼具温带大陆性和海洋性季风气候,大部分区域海拔低于 500 m,其中泽雅-布列亚及兴凯湖平原为远东农耕重点地带,其雨热条件适宜种植谷类(大麦、燕麦、荞麦)、大豆、水稻等农作物,其中犹太自治州还大力发展果类种植^[14]。从研究区内中俄跨境农业发展现状来看,两地近年来不断深化农业生产互补性合作,其中黑龙江省对俄农业合作种植面积超过 950 万亩,在远东从事农业开发的企业超过 200 家。双方科研单位的农业技术性交流以及农作物优势品种的进出口情况也呈上升态势,其中黑龙江省对阿穆尔州主产的大豆进口逐年大幅增长,有效缓解了我国对于该类作物的需求缺口^[15]。而在当今气候变化的背景下,中俄两地的气温等农业气象资源条件不断变化,农业自然灾害的频率和严重程度也随之增加,对中俄跨境地区农业方面的贸易合作及农产品安全产生重大影响。故此有必要摸清该区域农作物生长发育的热量资源情况,从所处气候条件角度对于研究区农业生产活动、灾害防控及后备耕地潜力分析提供相关基础数据和理论参考。

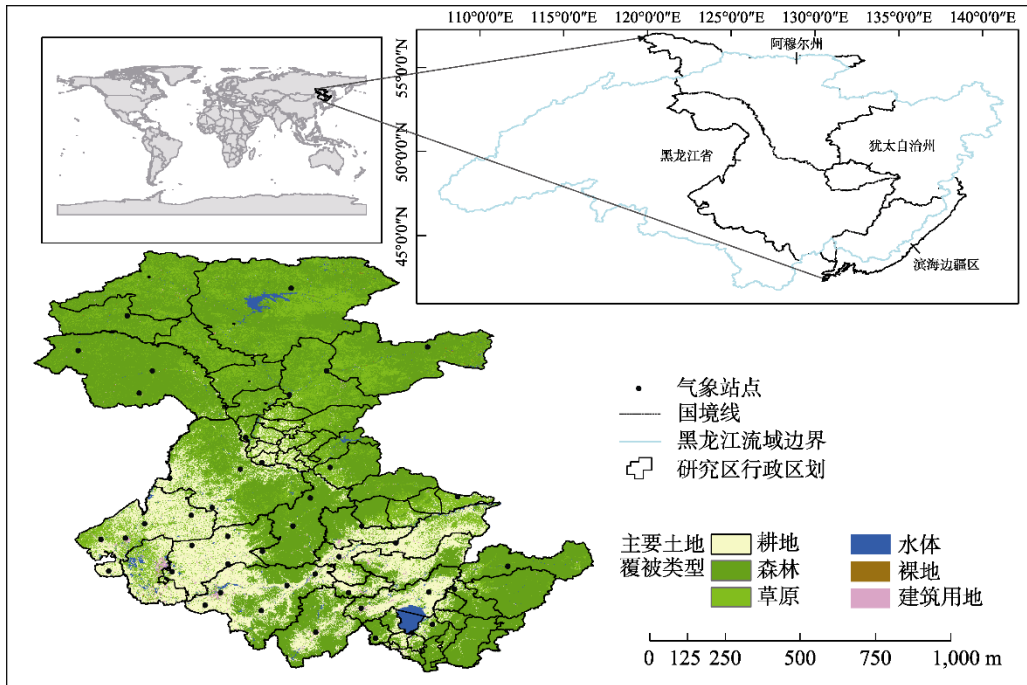


图1 研究区地理位置图

2 数据集元数据简介

《黑龙江流域中俄跨境地区 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ 有效积温数据集（2002–2020）》^[16]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

制作本数据集的原始气象数据产品来源于欧洲中期天气预报中心¹发布的全球逐小时2 m空气温度数据，数据时间为2002年至2020年。结果验证数据来源于基于CN05.1格点数据资料计算的2002–2018年中国黑龙江省对应有有效积温数据以及Elena Grigorieva基于气象站点观测的逐日气温数据制作的2002–2011年俄罗斯远东南部地区有效积温数据。

3.1 算法原理

有效积温（effective accumulated temperature, EAT）是与植物生长息息相关的评价指数，其通过统计高于生物学零度的日平均气温（有效温度）累积值来反映供目标植物适宜生长的热量资源储量。该指数的构建过程包含了植物在生长季节所经历的时间和温度等信息，故此该指数的变化将对植物物候期产生影响，进而导致各区域农业生产活动及其结果的变化。具体组合计算公式如式1、式2所示，而现有研究表明，利用小时级记录的温度数据进行逐日平均温度计算将会更为准确的代表某地某天的气温状况，从而对于该要素

¹ European Centre for Medium-Range Weather Forecasts. <https://www.ecmwf.int/en/forecasts/dataset/ecmwf-reanalysis-v5>.

表1 《黑龙江流域中俄跨境地区 0.25°×0.25°有效积温数据集 (2002–2020)》元数据简表

| 条 目 | 描 述 |
|-----------|---|
| 数据集名称 | 黑龙江流域中俄跨境地区 0.25°×0.25°有效积温数据集 (2002–2020) |
| 数据集短名 | EffecAccTemp_CR_2002-2020 |
| 作者信息 | 周业智 0000-0002-6826-151X, 中国科学院地理科学与资源研究所, zhouyz@lreis.ac.cn 王卷乐 0000-0002-5641-0813, 中国科学院地理科学与资源研究所, wangjl@igsnr.ac.cn 李凯 0000-0001-6234-6806, 中国科学院地理科学与资源研究所, lk@lreis.ac.cn Grigorieva, E. A. 0000-0002-7811-7853, 俄罗斯科学院区域问题复杂分析研究所远东地区分所 eagrigor@yandex.ru |
| 地理区域 | 黑龙江流域内部中俄跨境行政区域 (黑龙江全省、犹太自治州、阿穆尔州和滨海边疆区部分地区) |
| 数据年代 | 2002–2020 |
| 时间分辨率 | 1 年 |
| 空间分辨率 | 0.25°×0.25° |
| 数据格式 | .shp、.tif、.xlsx |
| 数据量 | 19.9 MB (压缩后) |
| 数据集组成 | 本数据集内容包括: (1) 研究区边界数据; (2) 研究区 2002–2020 逐年 0.25°×0.25°有效温度(≥0℃、≥5℃、≥10℃和≥15℃)始末时间数据; (3) 研究区 2002–2020 逐年 0.25°×0.25°有效积温(≥0℃、≥5℃、≥10℃和≥15℃)数据; (4) 有效积温的验证数据 |
| 基金项目 | 中国科学院 (XDA2003020302); 中国工程院 (CKCEST-2022-1-41) |
| 数据计算环境 | Python, ArcGIS |
| 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.geodoi.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 ^[17] |
| 数据和论文检索系统 | DOI, CSTR, Crossref, DCI, CSCD, CNKI, SciEngine, WDS/ISC, GEOSS |

的计算结果进行更精确的表征^[18,19]。故此本研究中关于日平均气温的计算方法如式 3 所示:

$$EAT = \sum_{i=1}^m (T_i - T_{\text{base}}) \quad (1)$$

$$T_i = (T_{\text{max}} + T_{\text{min}}) / 2 \quad (2)$$

$$T_i = \sum_{k=1}^{24} T_k / 24 \quad (3)$$

式中, T_i 为按不同统计方法计算的第 i 天的日平均温度 (°C), T_{base} 为目标作物适宜生长的基础温度 (°C)。 $i=1, 2, \dots, m$ 为“逐日平均气温 ≥ 生长基础温度”的时段范围, T_{max} 和 T_{min} 为当天的最高和最低温度 (°C), T_k 为一天内逐小时记录的气温数据。

3.2 技术路线

图 2 为本研究的整体工作流程，由数据获取与预处理、作物生长界限温度选定、有效积温始末时间确定与统计以及成果质量检验等四部分组成，具体工作流程如下：

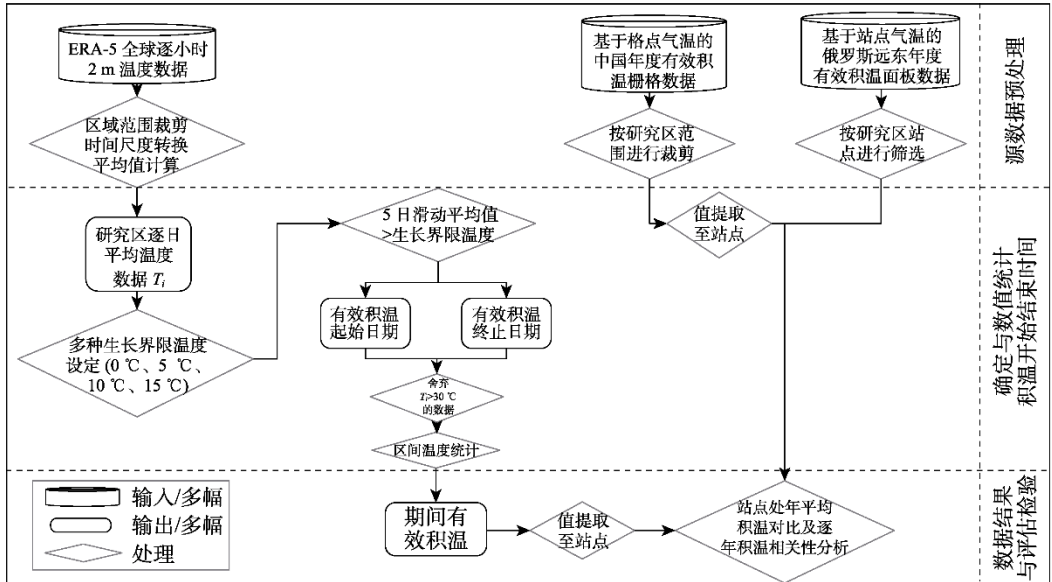


图 2 数据研发技术流程图

3.2.1 源数据预处理

在制作本数据集的原始数据处理过程中，本研究利用 python 语言和 ArcGIS 平台基于研究区矢量范围完成对研究时段内 ERA-5 数据的批量裁剪，而后再将一天内的逐小时温度数据进行平均得到 2002–2020 年该区域逐日平均气温。同时本研究对所采用的验证数据按类型进行栅格数据裁剪及面板数据筛选等预处理操作。

3.2.2 作物生长界限温度选定

植物会随着长时间的推移显现出其对于各量级温度的适应能力，当其周围温度高于一定数值时会开始发育，反之在其以下则鲜有生长。经过相关研究者对各类型作物的观测实验与数据整理，其中主要经济作物的生长界限温度如表 2 所示：

表 2 与几种主要经济作物的生长阶段相关的界限温度^[20]

| 作物类型 | 生长界限温度 T_{base} (°C) |
|------|------------------------|
| 卷心菜 | 0 |
| 豌豆 | 4.5 |
| 小麦 | 5 |
| 马铃薯 | 7 |
| 玉米 | 10 |
| 大豆 | 10 |
| 水稻 | 15 |

结合研究区实际种植的作物类型,本文最终选定 $T_{\text{base}}=0、5、10$ 和 $15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 来表征研究区多种有效积温的起始(结束)的“基线”温度。

3.2.3 有效温度始末时期的确定

在某一年有效积温始末时期的确定流程中,本文首先根据研究区的历史物候和生育期统计信息将有效温度开始与结束日期出现的时间段分别设定为每年 1–7 月和 8–12 月。然后选择 5 日滑动平均值(该年内每天取当日、前 2 日和后 2 日的 5 日序列计算平均值)大于设定的界限温度的最长一段时期作为有效温度起始(终止)范围,在起始范围的首个序列中,挑选第一个 T_i 大于界限温度的日期作为起始日;在终止范围的最后一个序列中,选取最后一个 T_i 大于界限温度的日期作为终止日。

3.2.4 有效积温计算与成果质量检验

在有效积温的计算过程中,除考虑作物的生长基础温度 T_{base} 外,其在生育期内的最高上限温度 T_{UT} 也会对作物生长情况产生影响。先前研究显示极端高温造成的热浪天气会对各类作物的生长发育造成一定的减缓与抑制^[21,22]。综合考量研究区主要作物各发育阶段的试验资料及相关文献^[11,20,23],本研究选定 $T_i=30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 作为研究区有效积温统计的上限温度。

在 T_i 大于 T_{base} 的时间范围内,将小于 $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的 T_i 与四种 T_{base} 的差值进行累加获得研究区逐年有效积温(图 3)。后将积温统计结果与基于实测数据制作的验证结果进行相关性分析,以评估本数据产品对该区域热量资源表征的质量和效果。

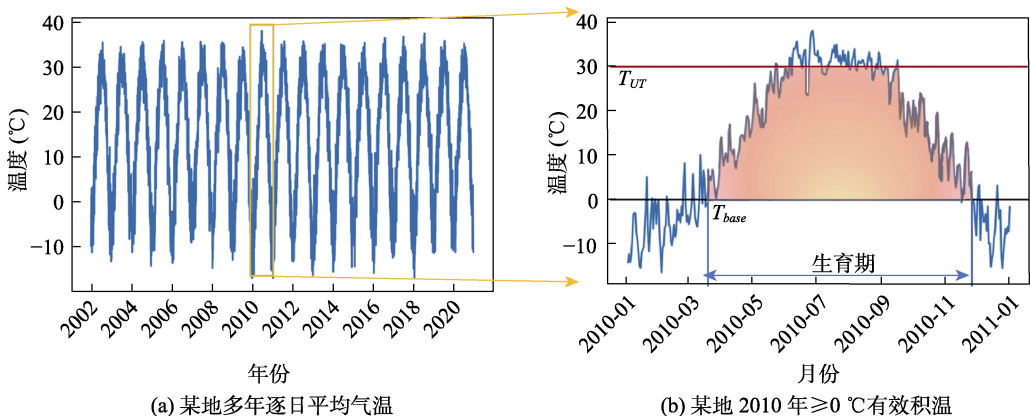


图 3 本研究有效积温计算原理示意图

4 数据结果与验证

4.1 数据集组成

本数据集的边界矢量数据存储为 Shapefile 文件,数据名称为 studyarea.shp。有效温度始末时期及有效积温数据存储为单波段 Geotiff 文件,其中四种有效温度开始时间的数据名称格式为 $\text{at}T_{\text{base}}\text{firstday_EAT_}0.25^{\circ}\text{_YYYY.tif}$;结束时间的数据名称格式为 $\text{at}T_{\text{base}}\text{lastday_EAT_}0.25^{\circ}\text{_YYYY.tif}$;有效积温数据名称格式为 $\text{at}T_{\text{base}}\text{_EAT_}0.25^{\circ}\text{_YYYY.tif}$ 。其中 T_{base} 表示本研究设定的四种生长基础温度,EAT 表示数据内容为有效积温结果; 0.25°

表示数据集的空间分辨率为 0.25°×0.25°；YYYY 表示数据文件所处时间为 YYYY 年，数据集其他信息如表 3 所示。验证数据中，黑龙江省有效积温数据存储为单波段 Geotiff 文件，名称格式与研究数据集中的对应结果相同，而基于气象站点统计的俄罗斯远东南部地区有效积温数据集存储为.xlsx 文件。

表 3 黑龙江流域中俄跨境地区有效积温栅格产品属性信息

| 编号 | 属性 | 研究数据数值 |
|----|------|-------------|
| 1 | 像素类型 | 浮点型 |
| 2 | 行数 | 67 |
| 3 | 列数 | 50 |
| 4 | 像素值 | 0–4,000 |
| 5 | 像素大小 | 0.25°×0.25° |
| 6 | 坐标系统 | WGS84 |

4.2 数据结果

4.2.1 有效积温时空变化分析

通过先前的数据处理流程得到研究区四类有效积温年度空间分布及趋势变化情况，其中 ≥ 0 °C 的情形下的对应结果如图 4 所示。

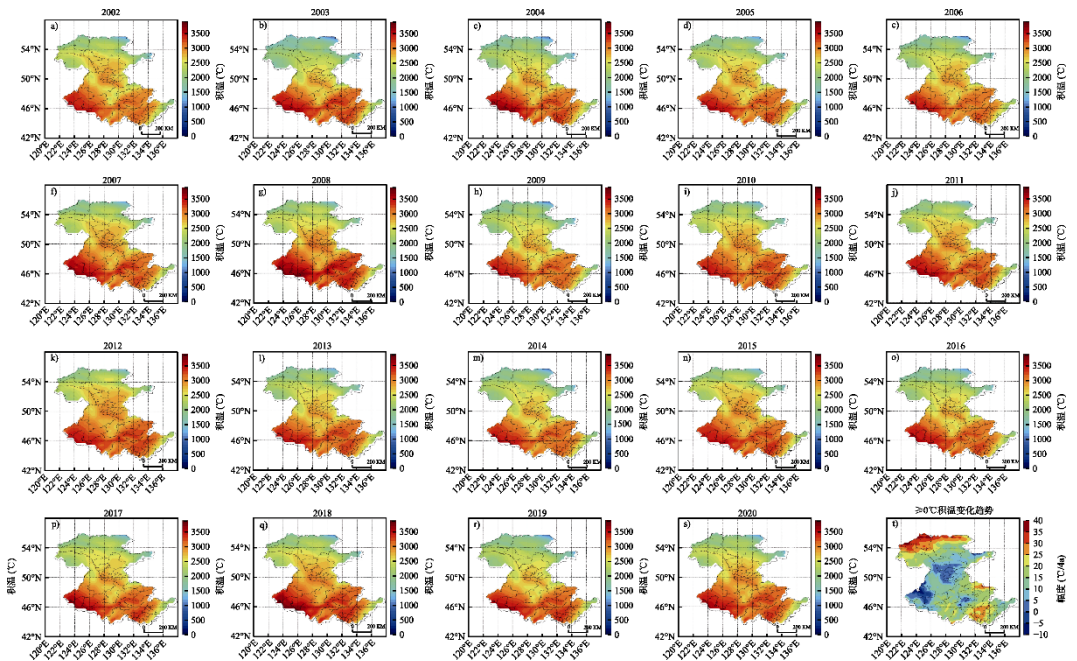


图 4 研究区 2002–2020 年 ≥ 0 °C 的有效积温空间分布（4a–4s）及其历年变化趋势图（4t）

由上图可知，研究区内中俄两地 ≥ 0 °C 的有效积温空间格局总体呈现由北向南增加的态势，其中大于 3,000 °C 的积温高值区主要分布于黑龙江省东西两侧、俄罗斯远东阿穆尔州南部以及滨海边疆区西部等地，与研究区耕地分布情况总体吻合。低值区位于阿穆尔州西北部高海拔地区，该地常年积温位于 1,000 °C 以下。而就 19 年间的积温变化趋势而言，

研究区大部分区域积温变化呈现增长态势，其中幅度较大 ($>20\text{ }^{\circ}\text{C}/4\text{a}$) 的区域出现在阿穆尔州南部、犹太自治州北部以及黑龙江省与滨海边疆区毗邻地区。而黑龙江北部与阿穆尔州交界以及该省西部地区年际积温较为稳定，范围内部分地区呈现出轻微下降的趋势 ($5\text{--}10\text{ }^{\circ}\text{C}/4\text{a}$)。

4.2.2 有效积温开始与结束时间分布格局与变化分析

从下图 5a、5b 中可以看出，研究区 $\geq 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 有效温度的最早开始和结束的时间及地点分别为 3 月和 9 月中旬，对应的最晚时间分别为 5 月和 11 月上旬。其中阿穆尔州东北部区域积温时间最短，而黑龙江省南部区域积温时间相对较长，持续时间最长的地区位于该省西南及东部与俄罗斯毗连地带。就研究区近 20 年前后两时段的对比情况可以发现，在黑龙江省东西两侧、俄罗斯犹太自治州和滨海边疆区西部的农业种植区近 10 年内的平均积温持续时间较前一时段延长（开始时间提前，结束时间推迟），而俄罗斯阿穆尔州南部对应区域的积温持续时间较前期则有所缩短。

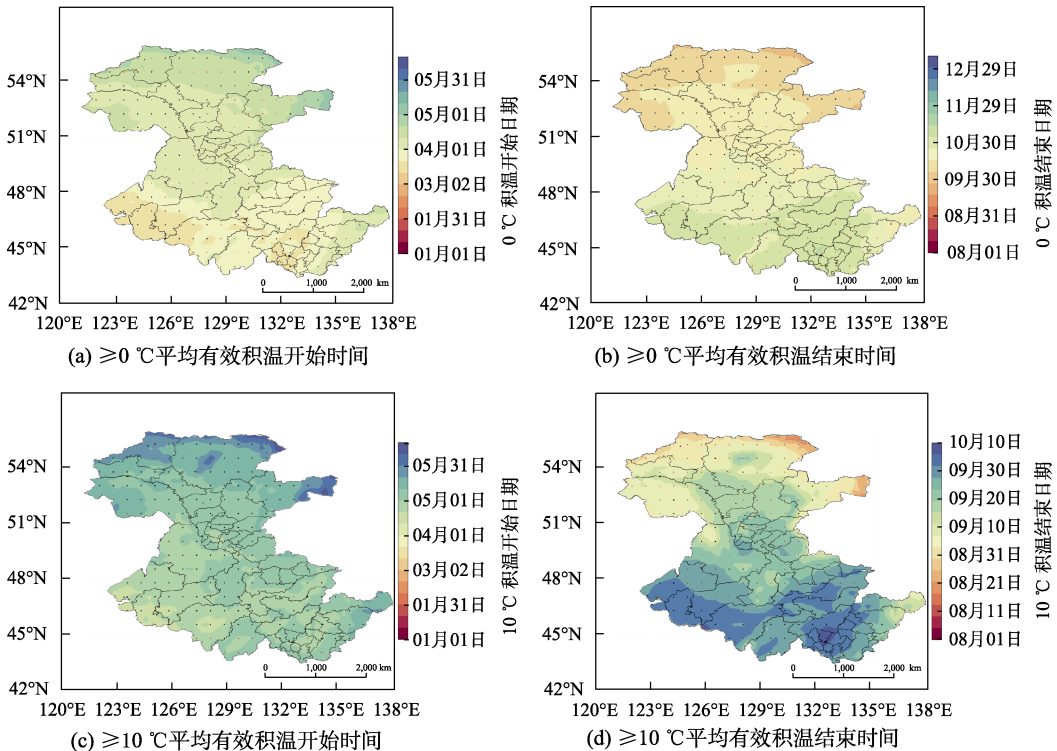


图 5 $\geq 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $\geq 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的研究区 2011–2020 年平均有效积温开始 (5a、5c) 与结束时间 (5b、5d) 空间分布 (黑色和红色散点分别代表对应位置较 2002–2010 年平均结果的提前与推迟)

研究区近 10 年间 $>10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 有效温度最早开始于 4 月中旬，最晚结束于 10 月上旬。黑龙江省大部分地势平坦地区的有效温度起始时间均早于 5 月份，而由西北向东南走向的高海拔区域的对应时间普遍延后 10 天左右。俄罗斯远东区域内的对应日期基本始于五月之后，阿穆尔州南部和滨海边疆区以西部分农业种植区积温的起始时间则略有提前。在积温结束时间的分布情况中，黑龙江南部、犹太自治州和滨海边疆区大部普遍晚于九月末，而阿穆尔州除其与黑龙江省毗邻区域外的积温时间结束于九月上旬左右。对比本研究前后两时段

的始末时间可以发现, 全区绝大部分地区近 10 年间起始时间较前期提前, 而在结束时间的对比结果中, 北部的俄罗斯两州出现推迟情况的样点占比超过 90%, 而黑龙江省与滨海边疆区两地积温末期的提前与延后比例基本持平, 其中出现提前的地区主要位于黑龙江省以西和东部中俄跨境区域。

4.2.3 有效积温区划面积比例的变化分析

根据本研究中 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 的有效积温热量标准, 可将研究区逐年动态的划分为四个积温区间 (对应 $\text{at } 10^{\circ}\text{C_EAT}$ 的范围为 $>1,400^{\circ}\text{C}$, $1,400-1,100^{\circ}\text{C}$, $1,100-800^{\circ}\text{C}$ 及 $<800^{\circ}\text{C}$), 并对其多年面积占比变化情况进行统计与分析 (图 6):

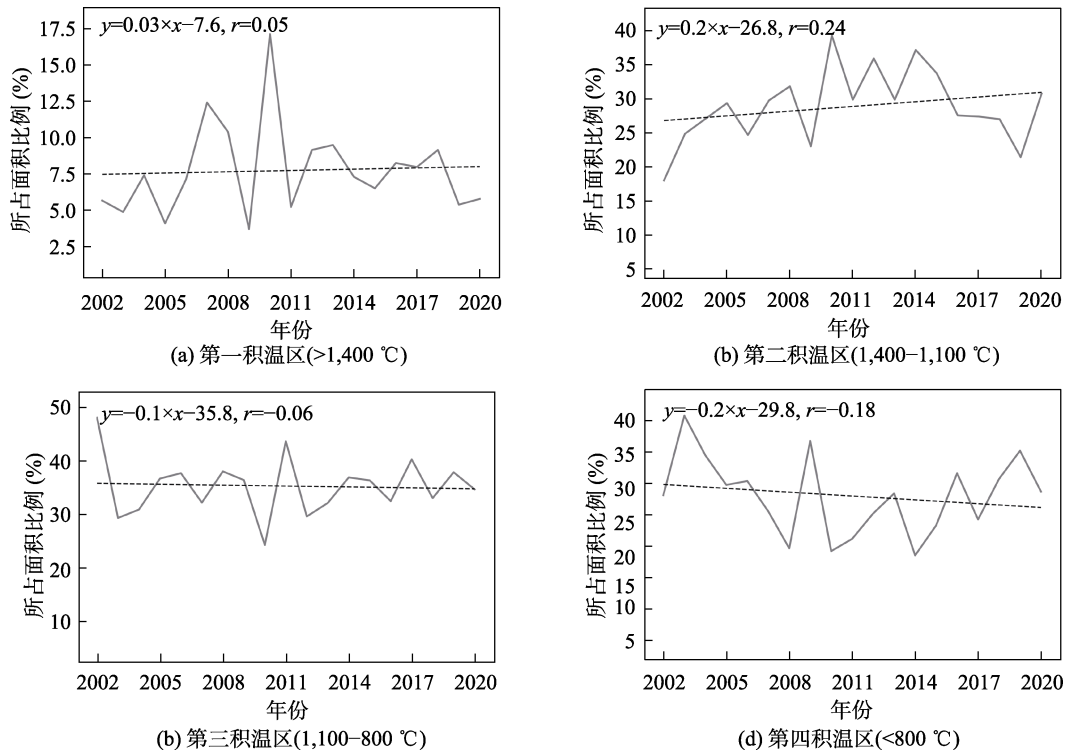


图 6 基于 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 有效积温标准的各区划年际所占面积比例

由上图可知, 研究区四类积温区划面积占比大致为 7.5%, 27.5%, 35% 和 30%。其中一、三积温区变化趋势较为稳定, 而第二 (四) 积温区年际变化呈现略增长 (下降) 态势。在各区划年际间波动较为明显的时间点中, 2010 年积温高值区面积占比较高, 其在第一、二积温区的面积分别超出 15% 和 35%。而与之相反的情况出现在与之相邻的 2009 年, 当年有效积温处在 $1,100^{\circ}\text{C}$ 以下的面积比例约占整个研究区的 7 成左右。

4.3 数据结果验证

在数据产品的验证过程中, 研究基于国家气候中心制作的 CN05.1 数据产品中所包含的逐日平均气温按上述处理流程对黑龙江省的 2002–2018 年有效积温进行计算并与本研究对应区域的结果进行对照分析。CN05.1 数据是基于 1961–2018 年间中国大陆范围内 2,400 余个国家级气象台站实测数据通过薄盘样条函数外推插值法制作的产品。先前研究得出的

积温与中国生态系统研究网络中积温站统计的对应结果具有较好的相关性^[24]。俄罗斯远东地区的验证数据采用 Elena Grigorieva 基于气象站点观测的逐日气温数据制作的 2002–2011 年俄罗斯远东南部地区四种对应有效积温数据^[11]。在验证前的数据预处理过程中,本研究将计算得到研究区及黑龙江省的栅格数据产品基于各气象站点位置通过双线性插值法进行数值提取,而后连同俄罗斯远东部分的计算结果进行相关性分析,对应结果如图 7、图 8 所示。

由以上两类有效积温的对比较验证结果可知,在 2002–2020 年间,除个别站点的数据有较大差异外,本研究计算得到的 $\geq 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $\geq 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的有效积温与基于 CN05.1 和实测温度数据得出的对应结果的多年平均值的体量基本一致(图 7a、8a)。而数据间的平均误差(Mean Error, ME)结果(图 7b、8b)显示,本研究在黑龙江省内大部分站点处的计算结果较对照数据存在高估,而在俄罗斯远东地区的情况则相反。在两类积温数据中,除黑龙江省第 7、8、19 和 23 号站点以及俄罗斯远东第 3 和 6 号站点外,剩余 37 座站点间的 ME 值均落入 $-200\text{--}200\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的范围。从两类积温数据组内的 Pearson 相关系数结果(图 7c、8c)来看,大部分站点的 r 值在 0.45 以上,基本反映出近 20 年来研究区两类积温年际间的波动变化状态。在各组对应的均方根误差(Root Mean Squared Error, RMSE)统计结果(图 7d、8d)中,两组数据的最大偏差范围未超过 $500\text{ }^{\circ}\text{C}$,且绝大部分站点的两类 RMSE 值处于各自最大值的 50% 以内。以上条件说明本研究与以上两种基于实测数据计算的积温结果拟合程度良好,可作为反映年尺度下该区域不同作物所需热量资源的基础数据。

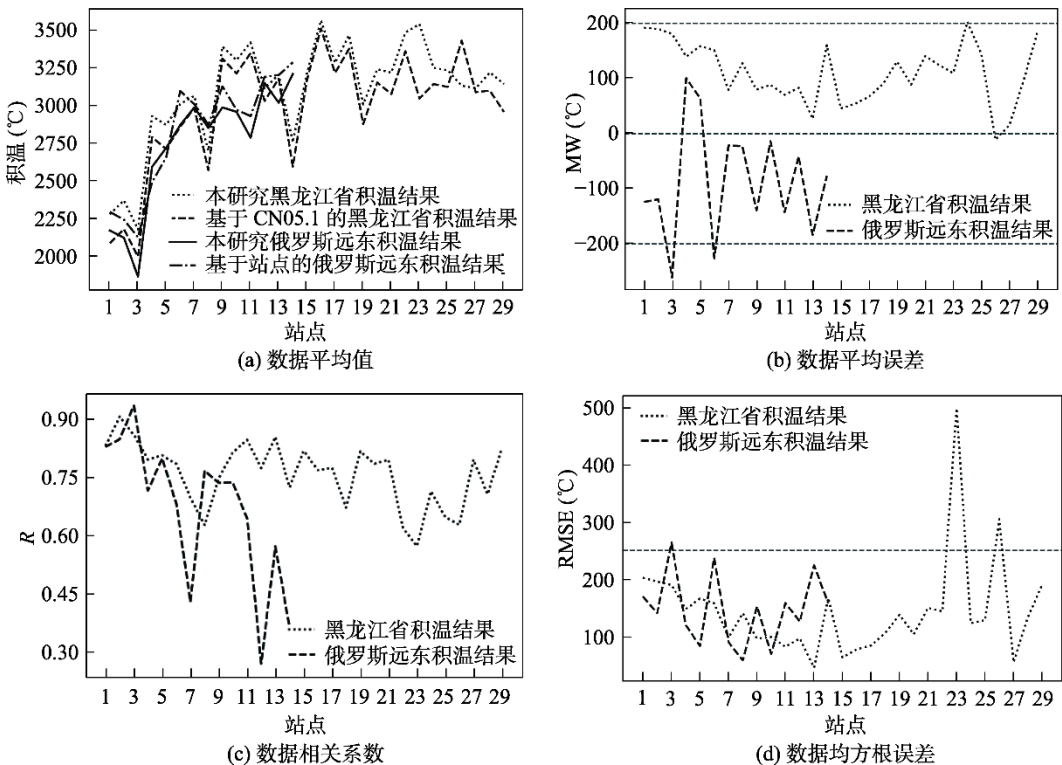
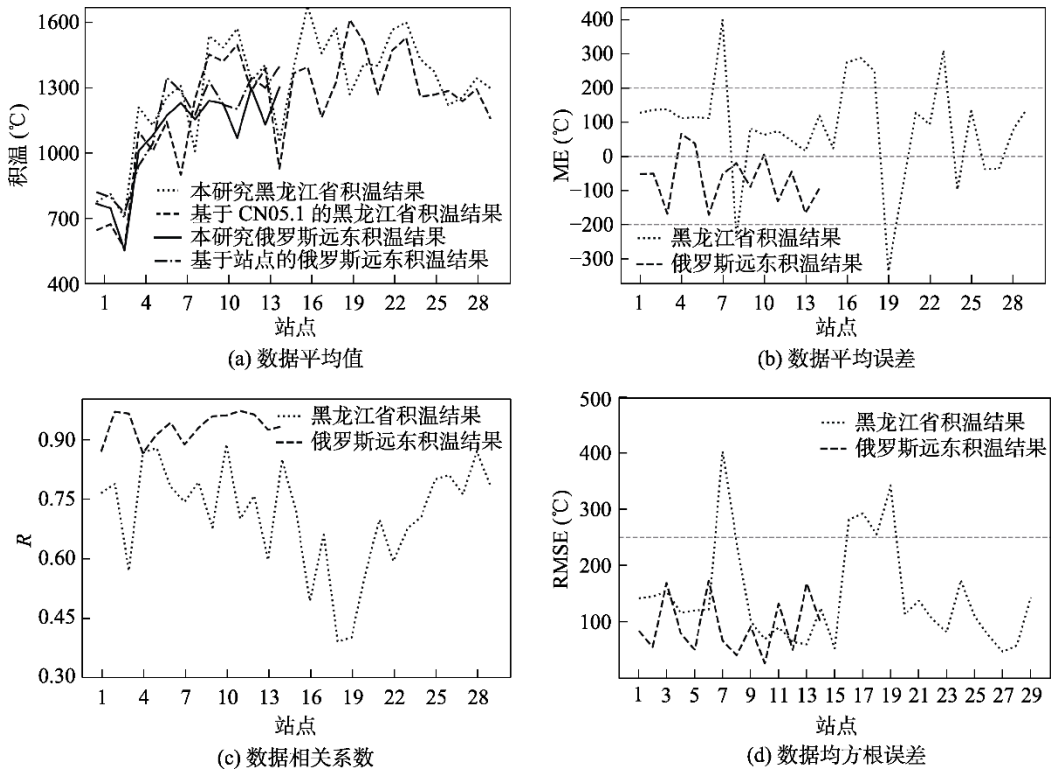


图 7 $\geq 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 有效积温的评估结果

图8 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 有效积温的评估结果

5 讨论和总结

本研究首先针对 ERA5 再分析产品中的逐小时 2 m 温度数据进行加工转换，将得到的逐日平均温度与设定的作物生长发育基础温度（0、5、10 和 15 $^{\circ}\text{C}$ ）按照对应计算原理对黑龙江流域中俄跨境地区 2002–2020 年间有效温度产生的始末时间进行确定并统计各生育期的年度有效积温，进而从地物类型和地貌条件等角度系统分析了两者的空间分布特征，并对各级有效积温区划面积在年际间的动态演变规律进行了宏观刻画。结果表明有效积温高值主要位于研究区南部平原地区，与研究区农耕地分布情况基本一致。而近 20 年内研究区大部分地区积温变化呈现稳定增长趋势，其中西北部地区在前三种情形下的对应情况更为明显，未来可就这一条件结合其他相关评价因素对于此类非农耕地域的后备潜力进行分析挖掘，进而加强在气候变化和国际局势等不确定条件下对于中俄跨边境农业发展和粮食安全的保障能力。

作者分工：王卷乐负责数据集开发总体设计工作；周业智、李凯、Grigorieva E.A 负责数据采集、处理及验证工作；王卷乐、周业智、李凯共同完成数据论文撰写。

致谢：感谢中国科学院特别交流计划项目对本研究的支持。

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] Dulamsuren, C., Hauck, M., Leuschne, C. Recent drought stress leads to growth reductions in *Larix sibirica* in the western Khentey, Mongolia [J]. *Global Change Biology*, 2010, 16(11): 3024–3035.
- [2] 白磊, 张帆, 文元桥等. 基于格点资料的 1961–2018 年中国霜冻灾害时空变化规律[J]. *中国农业气象*, 2021, 42(9): 761–774.
- [3] Schwartz, M. D., Ahas, R., Aasa, A. Onset of spring starting earlier across the northern hemisphere [J]. *Global Change Biology*, 2006, 12: 343–351.
- [4] Anwar, M. R., Liu, D. L., Macadam, I., et al. Adapting agriculture to climate change: a review [J]. *Theoretical and Applied Climatology*, 2013, 113(1): 225–245.
- [5] Zhou, Y., Li, N., Dong, G., et al. Impact assessment of recent climate change on rice yields in the Heilongjiang reclamation area of North-east China[J]. *Journal of the Science of Food & Agriculture*, 2013, 93(11): 2698–2706.
- [6] Ghahreman, N., Ebrahimi, E. GIS-based analysis of spatial distribution patterns of growing degree-days for agricultural applications in Iran [J]. *Desert*, 2012, 16(2): 143–151.
- [7] Aghemo, C., Albertino, A., Gobetto, R., et al. Correlation between isotopic and meteorological parameters in Italian wines: a local-scale approach. [J]. *Journal of the Science of Food & Agriculture*, 2011, 91(11): 2088–2094.
- [8] 曹萌萌, 李俏, 张立友等. 黑龙江省积温时空变化及积温带的重新划分[J]. *中国农业气象*, 2014, 35(5): 492–496.
- [9] 朱海霞, 吕佳佳, 李秀芬等. SRES A2/B2 情景下未来黑龙江省积温带格局的演变[J]. *中国农业气象*, 2014, 35(5): 485–491.
- [10] 顾红, 杜春英, 高永刚等. 黑龙江省近 48 年积温和降水的变化及其对作物种植带的影响[J]. *安徽农业科学*, 2010(10): 19602–19603.
- [11] Grigorieva, E. Evaluating the sensitivity of growing degree days as an agro-climatic indicator of the climate change impact: a case study of the Russian Far East [J]. *Atmosphere*, 2020, 11(4): 404.
- [12] Vliet, M., Ludwig, F., Zwolsman, J., et al. Global river temperatures and sensitivity to atmospheric warming and changes in river flow [J]. *Water Resources Research*, 2011, 47(2): W02544.
- [13] Zhou, Y., Wang, J., Grigorieva, E., et al. Dissecting the mutual response of potential evapotranspiration with vegetation cover/land use over Heilongjiang River basin, China [J]. *Water*, 2022, 14: 814.
- [14] 杜康, 盖莉萍. 俄罗斯远东联邦区农业种植业调查[J]. *西伯利亚研究*, 2013, 40(3): 27–31.
- [15] Guo, S. B., Yang, X. G., Zhang, Z. T., et al. Spatial distribution and temporal trend characteristics of agro-climatic resources and extreme climate events during the soybean growing season in Northeast China from 1981 to 2017 [J]. *Journal of Meteorological Research*, 2020, 34(6): 1–15.
- [16] 周业智, 王卷乐, 李凯等. 黑龙江流域中俄跨境地区有效积温数据集的研发(2002–2020)[J/DB/OL]. *全球变化数据仓储杂志*, 2022. <https://doi.org/10.3974/geodb.2022.04.05.V1>. <https://cstr.science.org.cn/CSTR:20146.11.2022.04.05.V1>.
- [17] 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).
- [18] 李亚丽, 妙娟利, 贺音. 日平均计算方法对气温统计值的影响[J]. *气象科技*, 2013(1): 88–82.
- [19] 刘焕莉, 李婵, 赵庆. 不同日平均气温计算方法对气温统计值的影响[J]. *中国农学通报*, 2015, 31(33): 269–272.
- [20] Grigorieva, E., Matzarakis, A., De Freitas, C. R. Analysis of growing degree-days as a climate impact indicator in a region with extreme annual air temperature amplitude [J]. *Climate Research*, 2010, 42(2): 143–154.
- [21] Blumenthal, C. S., Batey, I. L., Bekes, F., et al. Gliadin genes contain heat-shock elements: possible relevance to heat-induced changes in grain quality [J]. *Journal of Cereal Science*, 1990, 11(3): 185–188.
- [22] Roltsch, W. J., Zalom, F. G., Strawn, A. J., et al. Evaluation of several degree-day estimation methods in California climates [J]. *International Journal of Biometeorology*, 1999, 42(4): 169–176.
- [23] Matzarakis, A., Ivanova, D., Balafoutis, C., et al. Climatology of growing degree days in Greece [J]. *Climate Research*, 2007, 34(3): 233–240.
- [24] 白磊, 张帆, 尚明等. 基于格点数据的 1961–2018 年中国多种积温时空变化研究[J]. *地球信息科学学报*, 2021, 23(8): 1446–1460.