

doi: 10.6046/zrzyg.2021254

引用格式: 毛克彪, 严毅博, 曹萌萌, 等. 北美洲地表温度数据重建及时空变化分析[J]. 自然资源遥感, 2022, 34(4): 203–215.
(Mao K B, Yan Y B, Cao M M, et al. Reconstruction of surface temperature data and analysis of spatial and temporal changes in North America[J]. Remote Sensing for Natural Resources, 2022, 34(4): 203–215.)

北美洲地表温度数据重建及时空变化分析

毛克彪^{1,2}, 严毅博¹, 曹萌萌¹, 袁紫晋², 覃志豪¹

(1. 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所呼伦贝尔国家野外观测站, 北京 100081; 2. 宁夏大学物理与电子电气工程学院, 银川 750021)

摘要: 地表温度是反映区域自然环境和气候变化的重要指标, 高质量的数据对区域地表温度时空变化研究是非常重要的。北美洲近年来的气候变化较为异常, 因此研究分析该区域的地表温度具有较强的意义。文章基于 MODIS 地表温度数据, 结合地面站点、邻近像元和海拔数据重建了北美洲 2002—2018 年的遥感地表温度数据集, 并分析了其 17 a 的地表温度时空变化。重建的地表温度数据覆盖了所有陆地地表, 数据验证表明精度在 1 °C 左右。经过分析发现: 北美洲 17 a 间以平均 0.02 °C/a 的速度呈现波动增温趋势并在 2016 年达到历史峰值, 此后 2 a 里地表温度直线下降, 这与厄尔尼诺的影响密切相关; 北美洲春秋两季的增温幅度较大, 冬夏两季次之; 阿拉斯加北部地区和加利福尼亚半岛区域近年来的增温趋势极为显著; 植被和大气水汽显著影响着地表温度的变化, 40°N 以北植被和大气水汽与地表温度呈正相关变化, 40°N 以南植被和大气水汽与地表温度呈负相关变化。根据北美洲平均地表温度周期波动的变化趋势以及厄尔尼诺的影响, 在一定可靠程度上可以预测未来 1~2 a 整体地表温度变化趋势。

关键词: 数据重建; 地表温度; MODIS; 时空变化

中图法分类号: TP 79 **文献标志码:** A **文章编号:** 2097-034X(2022)04-0203-13

0 引言

地表温度是衡量地球环境的重要指标, 对于区域的物质能量循环、生态系统平衡以及人类的生产生活具有重要影响^[1-2]。区域地表温度会随着时间和空间的不同发生变化, 这种变化是地球内部、地球表层、大气层、太阳活动以及天体运行轨道在内的多个系统综合作用的结果^[3-4], 同时又深刻地影响着这些圈层和系统的平衡与稳定, 关乎着人类的生存发展和命运前途。很多专家学者把地表温度的时空变化与城市热岛^[5]、农作物生产^[6]、冰川融化^[7]、极端干旱^[8]、森林火灾^[9]和火山地震^[10]等现象联系起来, 得出很多重要的结论, 为区域的农业生产、生态保护、防灾减灾和经济社会发展提供了科学有效的决策依据。高质量的地表温度数据对于研究区域自然生态条件和气候变化是非常重要的。传统上人

们主要利用气象站点测量获得地表温度, 这样的数据虽然精度较高, 但是由于地理条件的限制, 很容易出现大片缺乏数据信息的区域, 导致数据的空间连续性较差^[11]。

随着科学技术的发展, 遥感技术成为获取地表温度的一种新的手段, 而且由于范围广和时效性强的优点, 遥感数据已经被广泛使用^[12-13]。然而遥感数据的局限性也是难以忽视的, 最大的缺点就是传感器接收到的信号极易受到大气条件的影响, 造成部分区域信息误差较大或缺失, 这会降低遥感数据的使用率以及数据分析的准确性。人们对这一问题已经有一些研究, 如通过云检测技术、改进反演算法以及数据修复重建等方式进行改善和优化^[14-16]。数据修复重建方法大致分为 3 类: ①在相同空间条件下, 通过其他时间尺度的相关数据修复缺失像元^[14]; ②在相同时间条件下, 通过其他空间尺度的相关数据来修复缺失像元^[15]; ③通过相同时间相

收稿日期: 2021-08-16; 修订日期: 2022-08-08

基金项目: 国家重点研发计划国际合作项目“全球农业干旱监测研究”(编号: 2019YFE0127600)、亚太空间合作组织(APSCO)框架项目“全球及重点区域干旱预报与监测”(编号: 20220714)、风云卫星推进计划 2022“风云全天候地表温度时空融合数据集的研制与应用”(编号: 2022070712)、宁夏科技厅灵活引进人才项目“北斗+土壤水分和植被含水量监测仪器设备研发及应用”(编号: 2021RXTDLX14)和中央公益事业单位基本科研业务费“高时空分辨率干旱监测关键参数土壤水分反演算法及应用研究”(编号: 1610132020014)共同资助。

第一作者: 毛克彪(1977-), 男, 研究员, 主要从事农业大数据、农业灾害遥感和粮食安全等方面的研究。Email: maokbiao@caas.cn。

同区域的其他类型数据来修复缺值像元,如地面站点数据、微波数据和其他再分析数据等^[16]。

MODIS 传感器搭载在 Terra 和 Aqua 卫星上,2 颗卫星分别于 1999 年和 2002 年发射,过境时间分别为 10:30 和 13:30。MODIS 传感器有 36 个光谱波段,可以同时提供反映陆地表面状况、云特性、气溶胶、地表温度、臭氧和海洋等多种特征的信息^[17-18]。MODIS 地表温度利用其中的中红外和热红外波段信息通过模型算法反演生成,其较好的时间和空间分辨率以及覆盖全球的空间范围使得 MODIS 地表温度数据已经被广泛应用于气候变化、水循环、蒸散、环境评估和农业生产等多个领域^[19-20]。然而 MODIS 地表温度数据依然存在部分像元信息缺失和精度不高的局限,这影响了对区域地表温度的分析研究。

北美洲近年来气候变化异常,高温、干旱、暴雨和雪灾等灾害频繁发生,灾害的发生与地表温度变化密切相关。本文结合地面站点、邻近像元和海拔数据,通过构建的数据修复模型重建了像元信息更加完整且精度得到保证的更高质量的北美洲遥感地表温度数据。在此基础上,结合其他地表温度大气参数和气候活动指数对北美洲 2002—2018 年的地表温度变化状况进行了分析。

1 研究区概况

北美洲位于西半球北部,东临大西洋,西临太平洋,北临北冰洋,南临墨西哥湾和加勒比海(图 1)。整个北美洲自西向东分别为西部科迪勒拉山系区、中部中央大平原和东部高原山地,呈现两侧高中间低的地形布局特征。西部的科迪勒拉山系冰川积雪广布,是北美洲多条河流的发源地,地表温度的变化对高山冰雪融水有重要影响^[21];同时该区域位于太平洋板块和美洲板块的交界处,地质活动频繁,火山地震频发,由于复杂的地形条件和地貌景观,很多著名的地质公园分布于此,如美国黄石公园和加拿大国家地质公园等。北美洲中部地区地势平坦,平原广布,是重要的农业生产地,但由于东西山脉阻挡形成的巨型长廊,该地极易受到来自北冰洋和墨西哥湾的冷暖气流交互影响,天气变化较为异常,给农业生产带来巨大威胁。东部的高原山地区域,在冬夏季分别受到五大湖区域和大西洋的湿润气流影响,在地形抬升的作用下形成暴雪和降雨,气象灾害频发^[22]。北美洲东北部的格陵兰岛大部分区域位于寒带,整个岛屿超过 80% 的土地被冰雪覆盖,格陵兰岛的冰雪覆盖对于稳定全球气候环境也具有重

要作用^[7],这与区域地表温度的变化密切相关。北美洲南部靠近热带的区域,夏季极易受到热带气旋活动的影响,形成飓风、暴雨和洪涝等特大灾害,地表温度伴随着气象灾害发生显著的变化,对当地的经济生产和发展造成巨大危害。因此,研究该地区的地表温度时空变化对于农业生产、生态保护和防灾减灾具有重要意义。

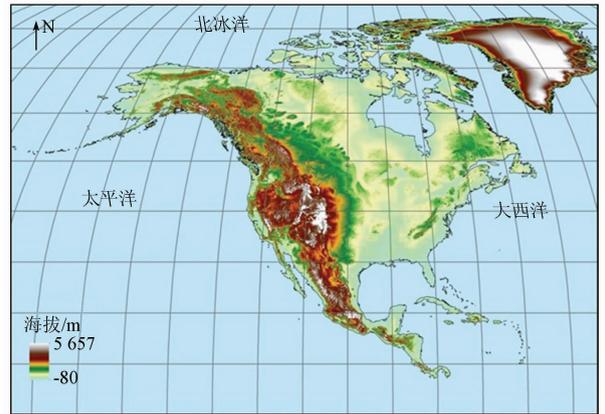


图 1 研究区示意图

Fig. 1 Study Area

2 数据和方法

2.1 数据资料

2.1.1 遥感地表温度产品

遥感地表温度数据观测范围大、时效性强、空间连续性好的特点很好地弥补了传统气象站点数据的不足,能较好地展示地表信息的空间变化,很适合做大尺度地理数据的空间分析^[23-25]。Wan 等^[26-27]对 MODIS 地表温度的反演算法和精度验证问题做了大量的研究工作,他提出的广义分裂窗算法和日夜法是目前 MODIS 地表温度数据的官方反演算法。广义分裂窗算法是通过多种大气温度湿度廓线、地表比辐射率、地表温度和观测角度进行大气辐射模拟,建立查找表,根据该表来计算地表温度。通过大量的验证分析和改进,该算法的平均精度高于 1 K^[26]。日夜法是利用白天和夜间对同一地区 2 次观测的数据建立方程组,通过优化迭代计算,平均误差在 1 K 左右^[27]。本研究使用的是覆盖全球、空间分辨率为 0.05° 的地表温度月产品 MOD11C3 和 MYD11C3,时间尺度覆盖 2002—2018 年。MOD11C3 和 MYD11C3 产品通过日夜法反演并经过投影、拼接、重采样和平均合成得到。

2.1.2 地面站点数据

传统上人们主要通过布设气象站点测量地表温度,这种数据能较为准确地反映站点附近的地面温

度状况,数据精度高,可靠性强^[28];同时气象站点数据较少受到云雨天气的干扰,数据的完整度相对较高,覆盖的时间范围较长^[29],很多研究学者利用气象站点的统计资料对区域和全球地表温度进行了长时间序列的观测研究^[30]。虽然 MODIS 地表温度数据已经较为成熟,但由于云层干扰,部分区域仍然存在信息缺失和精度不高的问题,这影响了时空分析的精度。因此本文结合传统气象数据站点和邻近像元等数据对 MODIS 地表月温度数据进行了修复重构,并结合独立的站点数据对重构的地表温度进行验证。使用的气象站点数据来源于美国国家海洋和大气管理局的国家环境信息中心(National Oceanic and Atmospheric Administration - National Centers for Environmental Information, NOAA - NCEI)官方网站。NCEI 陆基观测资料收集了来自各大洲各地区的仪器数据,包括温度、露点、相对湿度、降水、风速和方向、能见度、大气压以及冰雹、雾和雷声等多种类型,可以获得关于小时、日、月、年和多年等多种时间尺度的数据。本研究首先选取了该机构提供的 2002—2018 年的 4 种小时尺度包括 01: 00, 10: 00, 13: 00, 22: 00 分别近似对应 MODIS 地表温度天数据中的 01: 30, 10: 30, 13: 30, 22: 30 这 4 个时刻,用小时的地面站点数据对不同时刻的 MODIS 地表温度天数据进行插值修复。在数据修复完毕后,重新选取了该机构提供的 2002—2018 年地表温度气象站点月数据资料,对重构的地表温度数据进行精度验证。

2.1.3 其他地表大气参数

地表温度的影响因素是复杂的,综合前人对地表温度形成机制的相关研究成果^[31-35]选取了归一化植被指数(normalized difference vegetation index, NDVI)、土壤水分(soil moisture, SM)、气溶胶光学厚度(aerosol optical depth, AOD)、云量和大气水汽含量 5 种地表大气参数并综合纬度、海拔分析地表温度空间差异的驱动因素。5 种地表和大气参数产品的详细介绍如表 1 所示。本研究使用的 NDVI、云量、AOD 和大气水汽含量数据均来自美国国家航空航天局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)提供的 MODIS 数据,本研究中的 SM 数据是使用 AMSR - E, SMOS 和 AMSR - 2 数据合成产生的。

表 1 其他遥感数据的介绍

Tab. 1 Introduction of other remote sensing data

类型	数据名称	时间分辨率	空间分辨率/(°)
NDVI	MOD11C2	月尺度	0.05
SM	被动微波土壤水分	月尺度	0.05
AOD	MOD08_M3	月尺度	1
云量	MOD08_M3	月尺度	1
大气水汽含量	MOD08_M3	月尺度	1

2.2 技术路线

2.2.1 数据修复技术流程

本文数据修复技术流程如图 2 所示。云和降雨等干扰导致部分区域数据精度不高是光学和热红外

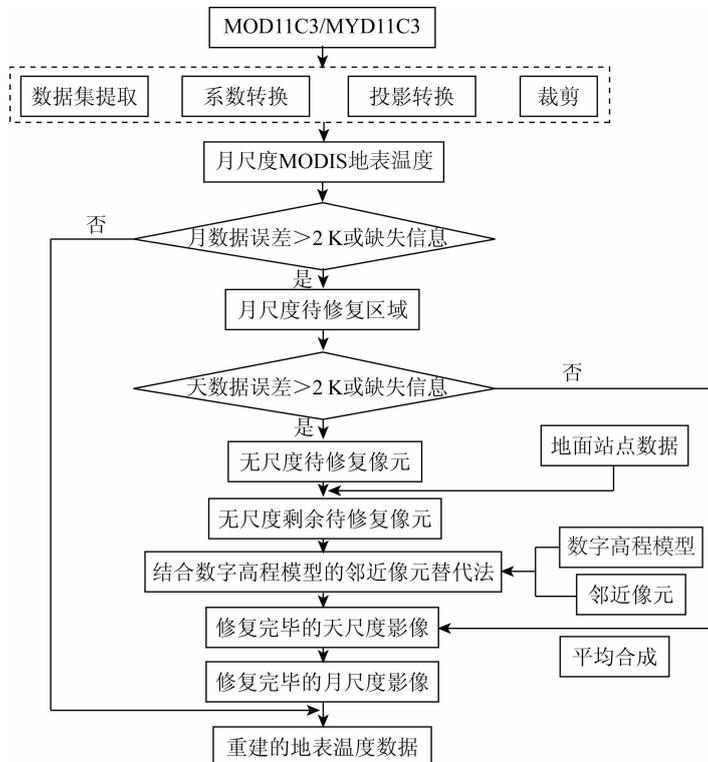


图 2 数据修复技术流程

Fig. 2 Flow chart of data restoration technology

遥感面临的共性问题^[36], 这会影响数据分析的精度。本研究首先对地表温度产品进行预处理, 包括数据集提取、系数转换、投影转换和裁剪等过程, 得到 2002—2018 年北美洲的月地表温度数据。在此基础上, 利用 MODIS 原始地表温度数据中的质量控制数据层对地表温度数据进行质量评价, 筛选出精度低于 2 K 和缺失信息像元作为月数据的待修复区域; 然后将此范围控制下的地表温度天数据中精度低于 2 K 和缺失信息的像元设为无效像元; 确定待修复像元后, 对其进行修复插值。首先把相应时间尺度下的地面站点数据根据经纬度坐标赋值给部分无效像元, 随后利用基于数字高程模型 (digital elevation model, DEM) 的邻近像元替代法对剩余的无效像元进行插值修复。无效像元被修复完毕后, 把修复后的天数据通过平均合成生成新的地表温度月数据。最后利用独立的气象站点月地表温度数据对重构数据进行精度验证。本研究所用到的邻近像元替代法是利用同一时间尺度下邻近区域的像元值进行替代修复, 把最邻近的像元值赋值给无效像元。在使用此方法进行插值之前, 已经利用地面站点数据对部分像元进行插值, 其他无效像元基本上都呈零星状分布。在这样的情况下, 利用邻近像元替代法可以保证一定的插值精度。

2.2.2 时空变化分析方法

为了从像元尺度揭示地表温度的年际变化规律, 利用最小二乘法和皮尔逊系数法分别计算 2002—2018 年地表温度长时间序列的年际变化率和地表温度与时间的皮尔逊系数, 年际变化率表示地表温度平均每年的变化幅度, 皮尔逊系数表示地表温度与时间的线性相关性, 综合这 2 个指标分析地表温度的时间变化规律。年际变化率和皮尔逊系数的公式分别为:

$$b = \frac{n \sum_{k=1}^n (kT_k) - \sum_{k=1}^n k \sum_{k=1}^n T_k}{n \sum_{k=1}^n k^2 - (\sum_{k=1}^n k)^2}, \quad (1)$$

$$r = \frac{n \sum_{k=1}^n (kT_k) - \sum_{k=1}^n k \sum_{k=1}^n T_k}{\sqrt{n \sum_{k=1}^n k^2 - (\sum_{k=1}^n k)^2} \sqrt{n \sum_{k=1}^n T_k^2 - (\sum_{k=1}^n T_k)^2}}, \quad (2)$$

式中: b 为地表温度随年份的变化率; r 为地表温度与时间的皮尔逊系数; k 为时间序列值; T_k 为第 k 年的平均地表温度; n 为总年数, 在本研究中取 17。

为了揭示地表温度空间的驱动因素, 首先分析了地表温度与 NDVI, SM, AOD, 云量和大气水汽含量之间的相关关系, 然后再次使用皮尔逊系数, 即:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (a_i - \bar{a})(b_i - \bar{b})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (a_i - \bar{a})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (b_i - \bar{b})^2}}, \quad (3)$$

式中: a_i 为第 i 年的地表温度; b_i 为第 i 年的其他地表大气参数; \bar{a} 和 \bar{b} 分别为地表温度的平均值和其他参数的平均值。

3 结果与分析

3.1 精度验证

在利用地面站点和邻近像元对 MODIS 地表温度月数据进行修复重构后, 重新随机地选取北美洲的部分气象站点, 使用站点月地表温度数据观测资料对重构数据的精度进行验证。不同月份地表温度月数据的精度验证结果如图 3 所示。可以看到, 通过插值修复重新生成的地表温度月数据与地面气象站点的均方根误差 (root mean square error, RMSE) 在 1~2 °C 之间, R^2 达 0.95 以上, 数据的精确度和完整度都有所提高, 可以更好地满足时空分析的精度要求; 同时可以发现不同月份地表温度数据的精度误差有所差异, 总体上夏秋季节 (6—11 月) 数据精度相对较高, 冬春季节 (12 月—次年 5 月) 的精度相对较低。

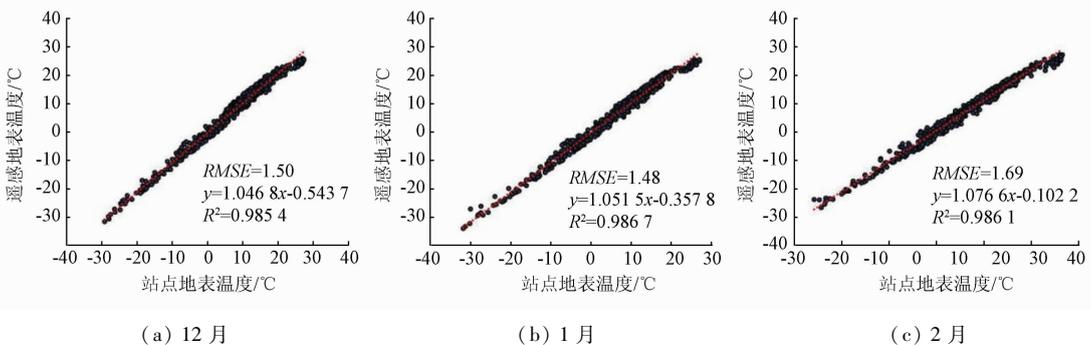


图 3-1 重建数据的精度验证
Fig. 3-1 Validation of reconstructed data

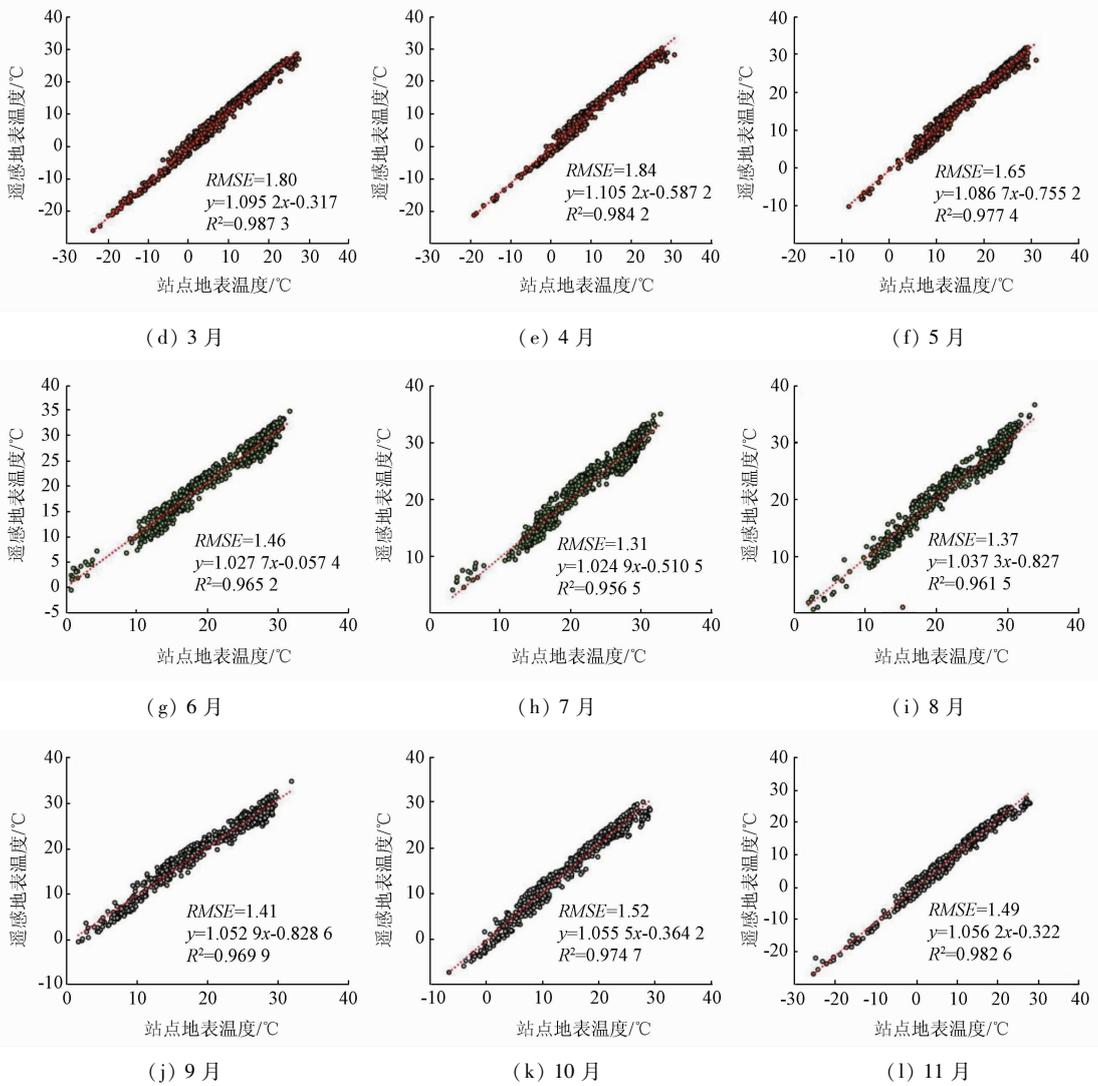


图 3-2 重建数据的精度验证

Fig. 3-2 Validation of reconstructed data

3.2 时空变化特征

3.2.1 空间分布特征

由于不同区域地理环境要素不同,北美洲地表温度的分布具有很强的空间差异。图 4 是 2002—2018 年北美洲年地表温度平均状况。北美洲年平均地表温度为 1.92 °C,地表温度空间差异最大为 67.73 °C;西海岸的加利福尼亚半岛是年平均地表温度最高的区域,达 32.41 °C,这里也是全球著名的干热区,主要原因在于该地区常年受副热带高气压控制降雨稀少,而且它位于板块交界处地质活动频繁,火山分布较多。年平均地表温度最低的区域位于格陵兰岛内部,达到 -35.32 °C,这主要是纬度较高和深居内陆导致的。整体上,北美洲地表温度南高北低,大约 50°N 以北中东部区域的地表温度呈现从西南向东北递减的规律,这主要因为该地区常年受到的极地东风和盛行西风的影响,东北风和西南风带来的冷暖水汽影响了温度的空间分布。

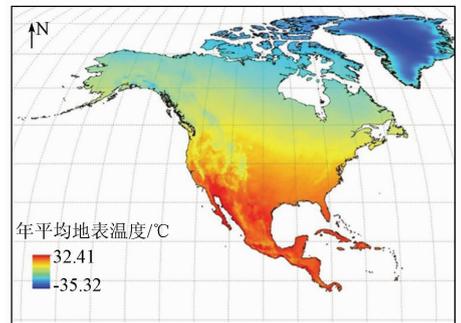


图 4 北美洲 2002—2018 年平均地表温度

Fig. 4 Average surface temperature of North America from 2002 to 2018

把每年的 12—次年 2 月、3—5 月、6—8 月、9—11 月分别平均作为春、夏、秋、冬 4 个季节的地表温度。图 5 和表 2 是 2002—2018 年不同季节的平均地表温度分布状况以及相关统计指标。可以发现整体上不同季节平均地表温度的分布与全年平均状况基本一致,但在局部地区有所差异,特别是冬夏两季

温带地区的河流湖泊与邻近的周边区域存在明显差异,如分布在北美洲东部的五大湖区域冬季温度高于周边,夏季则相反;4个季节的平均地表温度由高到低排列为夏>秋>春>冬;标准差体现了数据

的离散程度,根据表2中地表温度的标准差可以发现北美洲冷季(冬春)地表温度的空间差异较大,暖季(夏秋)的空间差异相对较小。

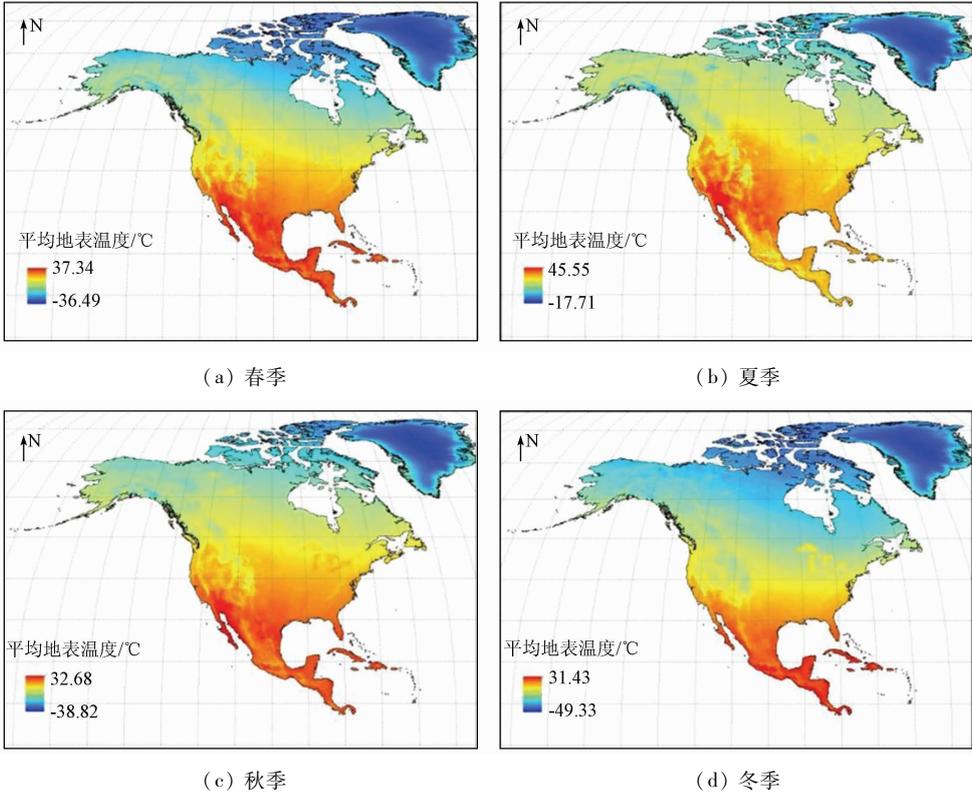


图5 北美洲在2002—2018年4个季节的平均地表温度

Fig. 5 Average surface temperature of North America in the four seasons from 2002 to 2018

表2 北美洲4个季节平均地表温度的部分统计指标

Tab. 2 Some statistical indicators of the average surface temperature in the four seasons in North America (°C)

指标	春季	夏季	秋季	冬季
平均值	1.03	15.72	2.63	-11.62
最大值	37.34	45.55	32.68	31.43
最小值	-36.49	-17.71	-38.82	-49.33
最大温度差	73.83	63.16	70.99	80.76
标准差	16.47	11.15	15.01	17.75

3.2.2 时间变化特征

根据 Terra 和 Aqua 这2颗卫星的成像时间,计算01:30与22:30的平均值近似作为夜间地表温度,计算10:30与13:30的平均值近似作为白天地表温度;计算了2002—2018年北美洲昼夜、四季以及全年平均地表温度距平值,如图6所示。可以发现:整体上,昼夜、四季、全年的地表温度距平值变化趋势基本一致,呈周期波动增长变化;全年平均

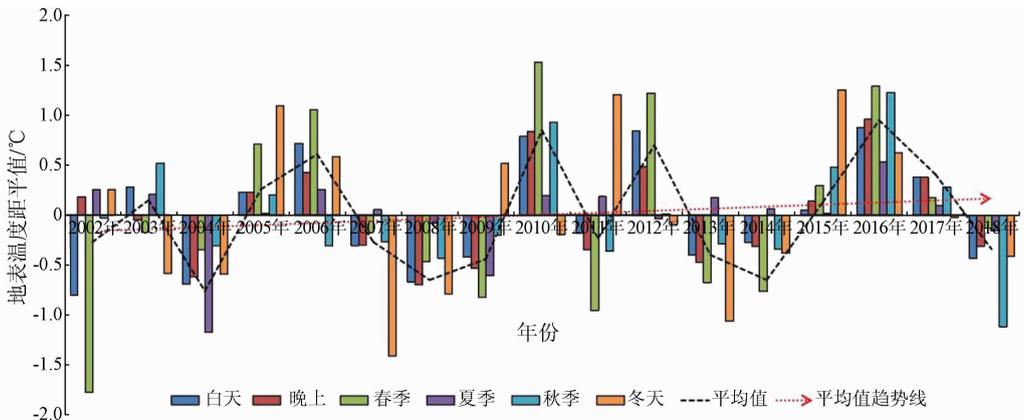


图6 不同时间维度地表温度的变化趋势

Fig. 6 Variation trends of surface temperature in different time dimensions

地表温度距平值每 2 个邻近极小值的间隔为一个周期,每个周期大约持续 4 ~ 5 a; 2016 年平均地表温度达到 17 a 间峰值状态,在此之后地表温度逐年下降; 2004 年是 17 a 间地表温度最低值年份; 根据距平值的大小,可以发现整体上冷季(冬春)地表温度的年际变化幅度大于暖季(夏秋),白天地表温度的年际变化幅度大于晚上。厄尔尼诺对全球温度影响较大,经对比 2002—2018 年厄尔尼诺指数与北美洲地表温度距平值,发现每爆发一次厄尔尼诺或拉尼娜现象,在北美洲将会出现一次阶段性的高温或低温事件。受 2015 年超强厄尔尼诺现象的影响,北美洲在 2016 年出现近年来的最高地表温度。

从像元尺度计算北美洲 2002—2018 年地表温度随时间的变化率及其与时间的皮尔逊系数,综合 2 个指标从空间上反映北美洲每个区域地表温度的变化状况。由于太阳辐射和人类活动状况的差异,

白天和晚上地表温度表现出不同的特征,因此首先计算了白天与晚上的变化率和皮尔逊系数,如图 7 所示。为了便于分析地表温度变化率的分布,本文综合北美洲的海岸边界,将整个大洲划分为多个 900 km × 900 km 的研究区域(图 8)。由图 7—8 可知北美洲 2002—2018 年间昼夜地表温度整体上呈现增温趋势,分别平均增长 0.03 °C/a 和 0.02 °C/a; 北美洲西北部寒带地区和西部加利福尼亚半岛近年来的增温趋势非常强烈,特别是阿拉斯加北部沿海部分区域白天和晚上的增温幅度非常巨大,均在 0.1 °C/a 以上; 昼夜地表温度变化趋势的空间分布整体上较为一致,但在局部地区有所差异,如晚上美国东南部和加勒比海沿岸的增温趋势和格陵兰岛南部的降温趋势相较于白天都更加强烈,而白天加利福尼亚半岛的增温幅度和北美洲中部城市达科塔州、怀俄明州和蒙大拿州等的降温幅度都大于晚上。

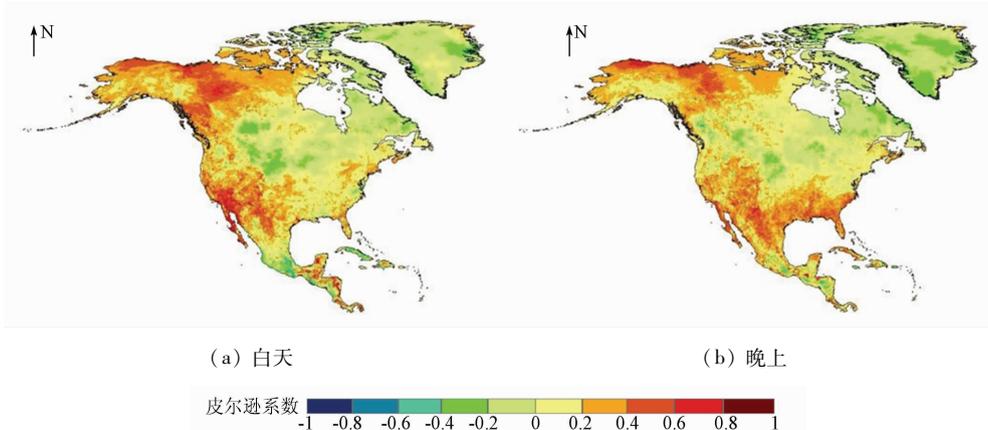


图 7 北美洲白天和晚上地表温度与时间变化的皮尔逊系数

Fig. 7 Correlation coefficients between day and night surface temperature and time changes in North America

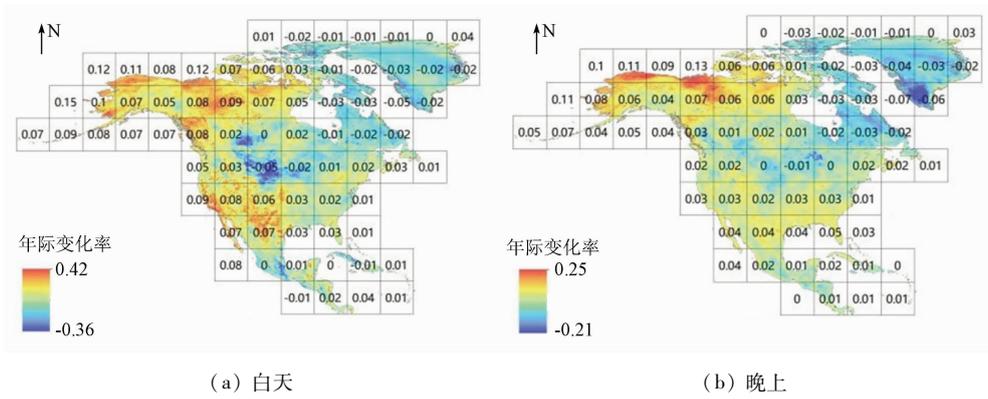


图 8 北美洲白天和晚上地表温度的年际变化率

Fig. 8 Interannual change rate of day and night surface temperature in North America

图 9—10 为不同季节的皮尔逊系数和年际变化率。从图 9—10 分析可以发现: ①春季,北美洲总体上呈增温趋势,平均每年大约增长 0.04 °C; 降温区域主要分布在东部大西洋沿岸,格陵兰岛南部和墨西哥半岛的降温幅度最大,最大的降温幅度可达

-0.04 °C/a; 北美洲西北部和加利福尼亚半岛区域近年来的增温趋势较为明显,最大可达 0.22 °C/a。②夏季,北美洲的降温区域分布较广,但总体上仍呈现增温趋势,平均每年大约增长 0.02 °C; 美国阿拉斯加州在夏季呈现降温趋势与其他季节形成明显差

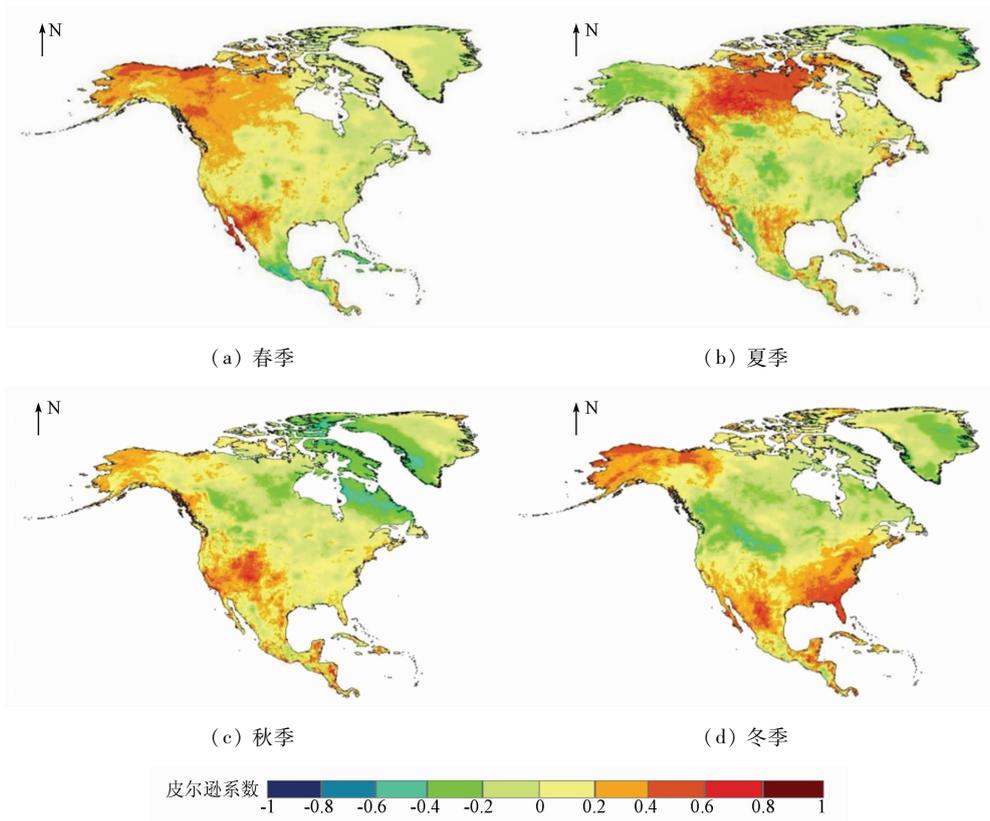


图 9 北美洲不同季节平均地表温度随时间变化的皮尔逊系数

Fig. 9 Pearson's coefficient of the average land temperature in different seasons in North America

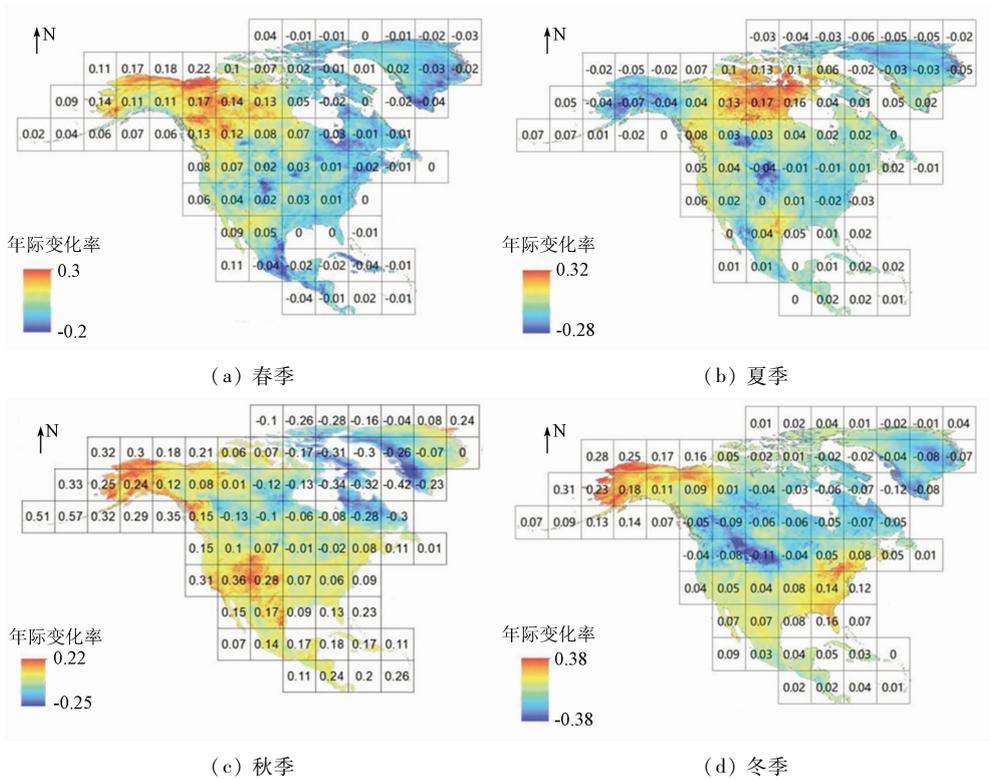


图 10 北美洲不同季节平均地表温度的年际变化率

Fig. 10 Inter annual change rate of average land temperature in different seasons in North America

异；加拿大中北部的增温趋势较为明显，最大增温幅度可达 $0.17\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{a}$ 。③秋季，整体为增温趋势，平均每年增长 $0.04\text{ }^{\circ}\text{C}$ ；主要降温区域分布在北美

洲东北部，该区域地表温度的年际变化率以巴芬湾和戴维斯海峡为中心向东北和西南方向递增，有明显的渐变规律性，最大降温幅度达 $-0.42\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{a}$ ； $20^{\circ}\sim$

40°N 之间落基山脉的东侧区域的增温趋势较为明显,平均每年增长 0.05 °C。④冬季,地表温度每年平均增长 0.01 °C,增温幅度相对其他季节较小;美国佛罗里达州冬季的增温趋势非常明显,平均每年大约增长 0.16 °C;40°~60°N 区域冬季的降温幅度较大,最大降温幅度可达 -0.11 °C/a。

全年平均地表温度的皮尔逊系数和变化率如图 11 所示。可以发现:①整体上,2002—2018 年间北美洲年平均地表温度呈增温趋势,平均年际变化率达 0.02 °C/a。②除格陵兰岛外,年平均地表温度变化率呈明显的纬度地带性分布;30°N 以南区域和 40°~60°N 之间的大陆东岸区域为降温区域,30°~40°N 之间区域和 60°N 以北区域为增温区域,增温区域与降温区域呈交叉分布。③美国阿拉斯加州北部和加拿大西北特区大部分以及加利福尼亚半岛近年来增温趋势较为明显,最大幅度的增温区域位于阿拉斯加和加拿大西北部沿海,增温幅度达 0.2 °C/a

以上,这个增温区域基本上位于北极圈的寒带气候内,这个结果深刻地说明北极高纬地区气候环境正在发生着剧烈的变化。一些研究者已经发现了阿拉斯加北极区域环境正在巨变^[37-38],本研究通过这一地区地表温度的增温趋势验证了这一结论。④加利福尼亚半岛的增温幅度较小,但地表温度与时间呈现非常明显的正相关关系,皮尔逊系数最大可达 0.8 以上。由于该区域位于板块交界处地壳运动活跃频繁,地表温度的升高一定程度上反映了区域地下能量的释放,因此该区域未来的火山地震活动需要引起足够的重视。⑤美国中东部地区(包括达科塔州、怀俄明州、蒙大拿州和内布拉斯加州)以及墨西哥南部近年来呈现降温趋势,但这种趋势并不明显,其与这些地区近年来频繁发生的暴雨、暴雪、洪涝、飓风和龙卷风等灾害密切相关。⑥格陵兰岛近年来的降温幅度较大,特别是南部地区,最大的降温幅度达 0.2 °C/a 以上。

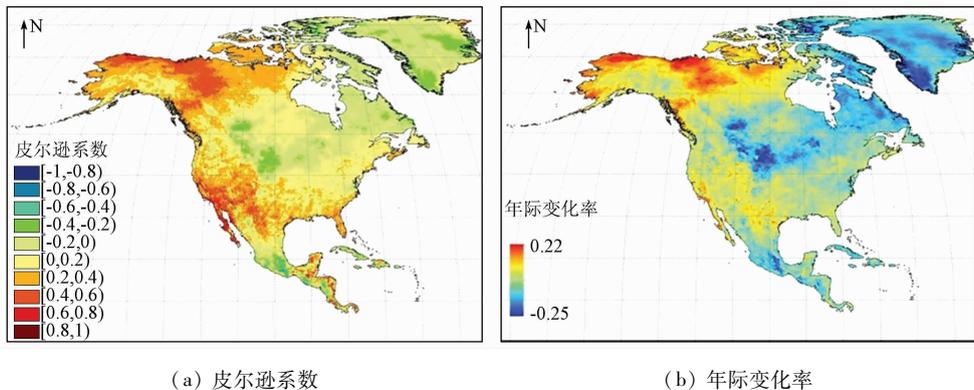


图 11 北美洲年平均地表温度年际变化率及其随时间变化的显著性

Fig. 11 Interannual change rate of the annual mean surface temperature in North America and its significance over time

3.3 与其他地表大气因素的相关回归分析

北美洲地表温度空间差异巨大,导致其空间差异的原因是复杂而多变的。利用皮尔逊系数法,分析地表温度与 5 种地表和大气参数(包括 NDVI, SM, AOD, 云量和大气水汽含量)对地表温度之间的相关关系,由于本研究所使用的大气参数产品空间分辨率较低与地表温度不一致,因此首先对地表温度进行了重采样使其与地表参数保持相同的空间分辨率。将北美洲划分为多个 900 km × 900 km 的网格,计算每个网格区域皮尔逊系数的绝对值 |r| 的平均值。相关系数如图 12 所示,各种相关性的平均值和最大值如表 3 所示。可以发现:①地表温度和 NDVI 有着较强的相关性,多个区域 |r| 达到 0.6 以上,部分区域甚至达到 0.75 以上,而且地表温度与植被的相关性具有明显的纬度地带性分异,大致 40°N 以北区域地表温度随植被的增加而增加,以南

区域地表温度随植被的增加而减少。②地表温度与 SM 的相关性没有明显的分布规律,这种相关性在北美洲西北部和东部拉布拉多半岛较强,|r| 可以达到 0.4 以上,其他区域则相对较弱。③地表温度与 AOD 的相关性整体较弱,而且没有明显的分异规律。④地表温度与云量在大部分区域都呈负相关关系,只有少部分区域呈正相关,部分区域的 |r| 可以达到 0.6 以上,而且北美洲南部地表温度与云量的相关性强于北方。⑤地表温度与大气水汽含量的相关性非常强,多个区域 |r| 大于 0.6 并接近于 0.8,这种相关性表现出明显的纬度地带性分异,大致在 40°N 以南区域呈负相关,以北区域呈正相关,而且北方的相关性强于南方。⑥在本研究所选择的 5 个参数中,大气水汽含量和 NDVI 与地表温度的相关性最强,云量次之,SM 和 AOD 与地表温度的相关性最弱。

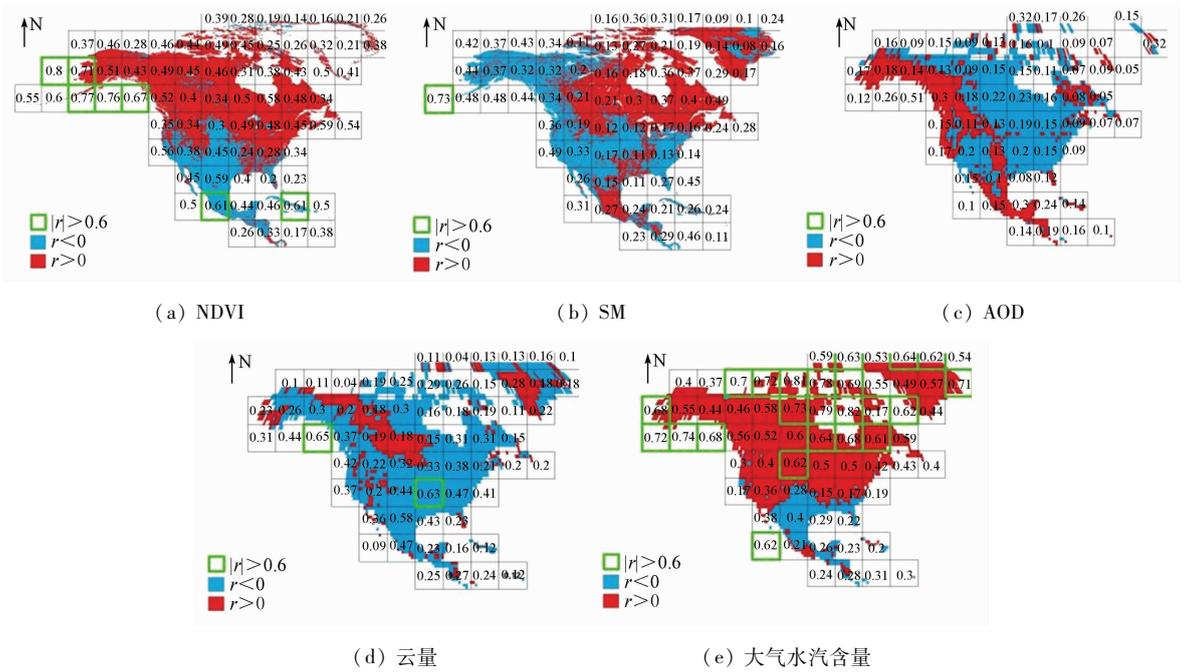


图 12 地表温度与其他参数的相关系数

Fig. 12 Correlation coefficients between surface temperature and other parameters

表 3 5 类其他参数的相关系数绝对值统计

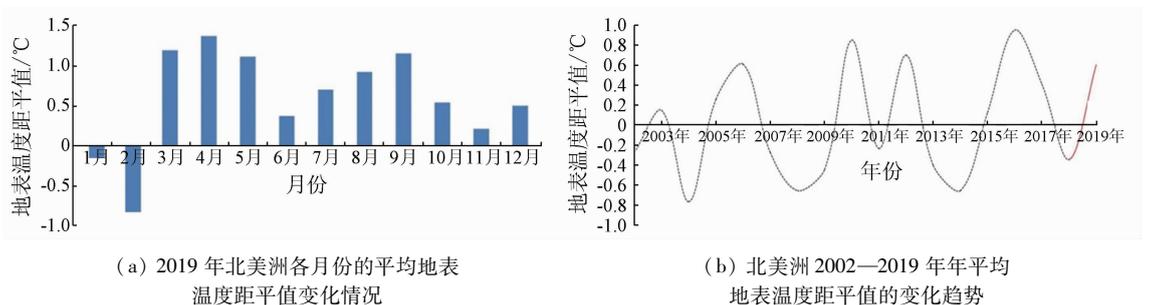
Tab. 3 Statistics of correlation coefficients of absolute values of 5 types other parameters

指标	NDVI	SM	AOD	云量	大气水汽含量
平均值	0.43	0.23	0.15	0.30	0.48
最大值	0.98	0.89	0.63	0.89	0.87

3.4 温度变化趋势预测

根据分析和一些相关结论,可以预测未来北美洲地表温度的趋势。2018 年的极低温发生在 2014 年最后一次极低温之后的 5 a(图 6),2018 年 8—12 月厄尔尼诺指数持续上升。根据北美洲地表温度的

4~5 a 周期变化趋势和厄尔尼诺的周期性格局及其对北美的影响,本文预测北美洲在 2018 年后将经历一个新的变暖趋势,这一趋势可能持续 1~2 a。使用 MODIS 的 2019 年地表温度月度数据进行验证,发现在 2019 年,除 1 月和 2 月外,其他月份的地表温度均高于前几年的地表温度平均异常(图 13(a)),2019 年的地表温度平均异常也高于 2002—2018 年(图 13(b))。这一结果与本文的预测是一致的,说明通过年平均地表温度的周期性波动变化规律以及厄尔尼诺-拉尼娜对地表温度的影响来预测北美未来地表温度变化趋势是可靠的。



(a) 2019 年北美洲各月份的平均地表温度距平值变化情况

(b) 北美洲 2002—2019 年年平均地表温度距平值的变化趋势

图 13 2019 年北美洲年平均地表温度与各月份平均地表温度的距平值

Fig. 13 Anomaly between the annual average surface temperature of North America and the average surface temperature of each month in 2019

4 结论与讨论

本研究在重构更加完整准确的遥感地表温度数据的基础上,从整体和局部揭示了北美洲 2002—2018 年地表温度的时空变化规律并着重分析异常

变化区域,并利用多种模型方法,结合多种数据资料在一定程度上对地表温度时空变化的驱动因素进行分析和探索。本研究得出的结论可以为地表温度的理论研究、区域的农业工业生产、人类的日常生活、生态环境的保护以及灾害的防治等方面提供有益的参考。

1) 利用本文建立的修复模型,通过结合地面站点、邻近像元和海拔等辅助数据可以有效地修复遥感数据中缺失信息和精度较低的像元,这对于提高遥感数据的利用率和分析精度是非常有意义的。

2) 北美洲的地表温度整体上从南到北递减,但由于受到极地东风带和盛行西风带的影响,北美洲中北部区域的地表温度从西南向东北递减。北美洲的地表温度空间差异较大,特别是西部科迪勒拉山系区域,山脉、河谷、湖泊、盆地交错分布,地表温度空间差异显著,温度相对较高河谷地区是西部地区农业生产和人类活动的主要区域。

3) 北美洲地表温度的年际变化趋势呈现很强的波动特征,大概4~5 a一个周期。2002—2018年间,北美洲整体上呈增温趋势,每年平均增长0.02℃,在全球气候变化的大背景下,这一变化趋势值得关注。就具体区域而言,北美洲西北部特别是北部沿岸以及加利福尼亚半岛地区近年来增温趋势非常明显。加拿大西北特区和美国阿拉斯加州的北部沿岸增温幅度最大,每年大约增长0.1℃,这种北极圈内的大幅增温趋势对于地区的物质能量循环以及生态环境变迁影响巨大。另外,值得注意的是加利福尼亚半岛地区的地表温度随时间增温的趋势非常强烈,地表温度与时间的相关系数达0.8以上,由于该地区是全球火山地震的多发区域,而地表温度的变化是地壳运动和地球能量释放的重要反映,因此该区域未来的火山地震活动需要引起足够的重视。北美洲30°N以南的低纬热带地区和N40°~60°的中东部地区近年来呈降温趋势,这与近年来当地频繁发生的雪灾、飓风和暴雨等气象灾害密切相关。

4) NDVI, SM, AOD, 云量和大气水汽含量5个参数与地表温度都有一定的相关性,5种相关性的性质和大小都随着区域的变化而有所不同。其中,大气水汽含量和NDVI与地表温度的相关性最为强烈,且它们都具有明显的纬度地带分异性,大致40°N以南区域呈负相关,40°N以北区域呈正相关;地表温度与云量整体上呈负相关变化,中北部小部分地区呈正相关变化;SM和AOD与地表温度的相关性相对较弱,也没有明显的空间分布特征。这一大区域尺度下的研究结果,对于地表温度影响因素和形成机制的相关研究以及地表温度数据的修复插值具有一定的参考价值。

5) 由于北美洲地表温度受厄尔尼诺现象影响较大以及自身周期波段变化的特征,可以根据其平均地表温度以及厄尔尼诺指数的变化趋势,对未来1~2 a内的地表温度进行一定可靠程度的预测,这有助于高温、干旱等灾害的预测与防御。

参考文献(References):

- [1] Anderson M C, Norman J M, Kustas W P, et al. A thermal - based remote sensing technique for routine mapping of land - surface carbon, water and energy fluxes from field to regional scales[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2008, 112: 4227 - 4241.
- [2] 唐国利, 任国玉. 近百年中国地表气温变化趋势的再分析[J]. *气候与环境研究*, 2005(4): 791 - 798.
Tang G L, Ren G Y. Reanalysis of surface air temperature change of the last 100 years over China[J]. *Climatic and Environmental Research*, 2005(4): 791 - 798.
- [3] Brunsell N A, Gillies R R. Length scale analysis of surface energy fluxes derived from remote sensing[J]. *Journal of Hydrometeorology*, 2003, 4(6): 1212 - 1219.
- [4] 毛克彪, 左志远, 朱高峰, 等. 全球气候和生态系统变化与星体轨道位置变化关系研究[J]. *高技术通讯*, 2016, 26(11): 890 - 899.
Mao K B, Zuo Z Y, Zhu G F, et al. Study of the relationship between global climate - ecosystem's change and planetary orbit position's change[J]. *High Technology Letters*, 2016, 26(11): 890 - 899.
- [5] 王建凯, 王开存, 王普才. 基于MODIS地表温度产品的北京城市热岛(冷岛)强度分析[J]. *遥感学报*, 2007(3): 330 - 339.
Wang J K, Wang K C, Wang P C. Urban heat (or cool) island over Beijing from MODIS land surface temperature[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2007(3): 330 - 339.
- [6] Guo J, Mao K, Zhao Y, et al. Impact of climate on food security in Mainland China: A new perspective based on characteristics of major agricultural natural disasters and grain loss[J]. *Sustainability*, 2019, 869(11): 1 - 25.
- [7] Hall D K, Williams R S, Luthcke S B, et al. Greenland ice sheet surface temperature, melt and mass loss: 2000—06[J]. *Journal of Glaciology*, 2008, 54(184): 81 - 93.
- [8] Xia L, Zhao F, Mao K, et al. SPI - based analyses of drought changes over the past 60 years in China's major crop - growing areas[J]. *Remote Sensing*, 2018, 171(10): 1 - 15.
- [9] Westerling A L. Warming and earlier spring increase western U. S. forest wildfire activity[J]. *Science*, 2006, 313(5789): 940 - 943.
- [10] Ouzounov D, Freund F T. Mid - infrared emission prior to strong earthquakes analyzed by remote sensing data[J]. *Advances in Space Research*, 2004, 33(3): 268 - 273.
- [11] 任国玉, 郭军, 徐铭志, 等. 近50年中国地面气候变化基本特征[J]. *气象学报*, 2005, 6: 942 - 956.
Ren G Y, Guo J, Xu M Z, et al. Climate change of China's mainland over the past half century[J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2005, 6: 942 - 956.
- [12] Zhao B, Mao K, Cai Y, et al. A combined Terra and Aqua MODIS land surface temperature and meteorological station data product for China from 2003—2017[J]. *Earth System Science Data*, 2020, 12: 2555 - 2577.
- [13] Mao K, Ma Y, Tan X, et al. Global surface temperature change analysis based on MODIS data in recent twelve years[J]. *Advance Space Research*, 2017, 59: 503 - 512.
- [14] Neteler M. Estimating daily land surface temperatures in mountainous environments by reconstructed MODIS LST data[J]. *Remote Sensing*, 2010, 2(1): 333 - 351.

- [15] Shen H, Li X, Cheng Q, et al. Missing information reconstruction of remote sensing data: A technical review[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine*, 2015, 3(3): 61–85.
- [16] Zhao L, Jin J, Wang S Y, et al. Integration of remote-sensing data with WRF to improve lake-effect precipitation simulations over the Great Lakes region[J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 2012, 117(d9): 1–12.
- [17] Mao K, Ma Y, Xia L, et al. Global aerosol change in the last decade: An analysis based on MODIS data[J]. *Atmospheric Environment*, 2014, 94: 680–686.
- [18] Cao M, Mao K, Yan Y, et al. A new global gridded sea surface temperature data product based on multisource data[J]. *Earth System Science Data*, 2021, 13: 2111–2134.
- [19] Kerr Y H, Lagouarde J P, Imbernon J. Accurate land surface temperature retrieval from AVHRR data with use of an improved split window algorithm[J]. *Remote Sensing of Environment*, 1992, 41: 197–209.
- [20] Mao K, Shi J, Li Z, et al. An RM-NN algorithm for retrieving land surface temperature and emissivity from EOS/MODIS data[J]. *Journal of Geophysical Research - Atmosphere*, 2007, 112(d21): 1–17.
- [21] Pepin N, Bradley R S, Diaz H F, et al. Elevation-dependent warming in mountain regions of the world[J]. *Nature Climate Change*, 2015, 5: 424–430.
- [22] Halliday W E D. Climate, soils and forests of Canada[J]. *Forestry Chronicle*, 1950, 26: 287–301.
- [23] Mao K, Qin Z, Shi J, et al. A practical split-window algorithm for retrieving land surface temperature from MODIS data[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2005, 26: 3181–3204.
- [24] Mao K, Shi J, Tang J, et al. A neural network technique for separating land surface emissivity and temperature from ASTER imagery[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2008, 46(1): 200–208.
- [25] Xia L, Mao K, Ma Y, et al. An algorithm for retrieving land surface temperature using VIIRS data in combination with multi-sensors[J]. *Sensors*, 2014, 14: 21385–21408.
- [26] Wan Z, Dozier J. A generalized split-window algorithm for retrieving land-surface temperature from space[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1996, 34(4): 892–905.
- [27] Wan Z, Li Z L. A physics-based algorithm for retrieving land-surface emissivity and temperature from EOS/MODIS data[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1997, 35(4): 980–996.
- [28] Fang S, Mao K, Xia X, et al. Dataset of daily near-surface air temperature in China from 1979 to 2018[J]. *Earth System Science Data*, 2022, 14: 1413–1432.
- [29] Wang P, Mao K, Meng F, et al. A daily highest air temperature estimation method and spatial-temporal changes analysis of high temperature in China from 1979 to 2018[J]. *Geoscientific Model Development*, 2022, 15: 6059–6083.
- [30] Hansen J, Lebedeff S. Global trends of measured surface air temperature[J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 1987, 92(d11): 13345–13372.
- [31] Julien Y, Sobrino J A, Verhoef W. Changes in land surface temperatures and NDVI values over Europe between 1982 and 1999[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2006, 103(1): 43–55.
- [32] Wang H, Mao K, Yuan Z, et al. A method for land surface temperature retrieval based on model-data-knowledge-driven and deep learning[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2021, 265: 1–19.
- [33] Remer L A, Kleidman R G, Levy R C, et al. Global aerosol climatology from the MODIS satellite sensors[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2008, 113(d14): 1–18.
- [34] Platnick S. The MODIS cloud products: Algorithms and examples from Terra[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2003, 41(2): 459–473.
- [35] Held I M, Soden B J. Robust responses of the hydrological cycle to global warming[J]. *Journal of Climate*, 2006, 19(21): 5686–5699.
- [36] Mao K, Yuan Z, Zuo Z, et al. Changes in global cloud cover based on remote sensing data from 2003 to 2012[J]. *Chinese Geographical Science*, 2019, 29(2): 306–315.
- [37] Yan Y, Mao K, Shi J, et al. Driving forces of land surface temperature anomalous changes in North America in 2002–2018[J]. *Scientific Reports*, 2020, 6931(10): 1–13.
- [38] Hinzman L D, Bettex N D, Bolton W R, et al. Evidence and implications of recent climate change in Northern Alaska and other arctic regions[J]. *Climatic Change*, 2005, 72(3): 251–298.

Reconstruction of surface temperature data and analysis of spatial and temporal changes in North America

MAO Kebiao^{1,2}, YAN Yibo¹, CAO Mengmeng¹, YUAN Zijin², QIN Zhihao¹

(1. *Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China;*

2. *School of Physics and Electronic-Engineering, Ningxia University, Yinchuan 750021, China)*

Abstract: Surface temperature is an important indicator that reflects the regional natural environment and climate changes. High-quality data are very valuable for the study of the temporal and spatial changes in regional surface temperature. In recent years, North America has witnessed relatively abnormal climate changes, thus the surface temperature in this region has great study significance. Based on the MODIS surface temperature data, this study reconstructed the remotely sensed surface temperature data set of North America from 2002 to 2018 and analyzed the

spatial and temporal changes in surface temperature over the past 17 years. The reconstructed surface temperature data cover all land surfaces of North America and guarantee precision of about 1 °C. The analysis results are as follows. North America had a fluctuating temperature increase at an average rate of 0.02 °C/a in the past 17 years. A historical peak in surface temperature increase occurred in 2016, followed by a sharp drop in the following two years, which was closely related to El Nino. In North America, the temperature increase was greater in spring and autumn than in winter and summer. In recent years, northern Alaska and the Baja California peninsula have experienced significant warming. Vegetation and atmospheric water vapor significantly affect the change in surface temperature. Vegetation and atmospheric water vapor are positively correlated with surface temperature in the north of 40° N, while they are negatively correlated in the south of 40° N. The general changing trend of surface temperature in the next 1 ~ 2 years can be predicted to a certain degree of reliability according to the periodic fluctuation trend of the average surface temperature in North America and the influence of El Nino.

Keywords: data reconstruction; surface temperature; MODIS; temporal and spatial changes

(责任编辑: 张 仙)