

李姗姗,艾轩,张建康,等. 基于 FY-4A 亮温估算榆林地区气温方法研究[J]. 陕西气象,2024(6):1-7.

文章编号:1006-4354(2024)06-0001-07

基于 FY-4A 亮温估算榆林地区气温方法研究

李姗姗^{1,2},艾轩¹,张建康¹,张博宇¹,屈艳梅¹

(1. 榆林市气象局,陕西榆林 719000;

2. 中国气象局秦岭和黄土高原生态环境气象重点开放实验室,西安 710016)

摘要:利用 2020 年 1—10 月 FY-4A 气象卫星的 1 级亮温产品数据、2 级云检测产品数据和陕西榆林地区地面气象观测站小时气温等相关辅助资料,构建了晴空条件下的神经网络气温估算模型,并利用地面气象观测站实测气温进行模型检验评估。研究表明:(1)由不同输入参数组合建立的模型气温估算精度存在差异;增加匹配 FY-4A 卫星云检测集可以增加符合条件的训练样本,从而提升模型估算精度。模型 6 的气温估算结果最优。(2)基于最优模型的气温估算结果与实测气温相关系数在 0.50 至 0.85 之间,相关系数大于 0.70 的估算样本超过 60%,表明该模型可以用于地面气象观测站分布较稀疏地区的气温预报。(3)模型在 12 时、18 时的估算精度较高,00 时、06 时估算精度有所下降。(4)模型在不同季节对气温估算的精度存在差异,春、夏、秋、冬季气温估算结果与实测气温绝对误差小于 3℃ 的站点数量占比分别为 79.70%、80.80%、80.60% 和 75.20%。

关键词:FY-4A 气象卫星;神经网络;气温估算;榆林

中图分类号:TP79

文献标识码:A

气温是描述陆地环境条件的重要参数,高时空分辨率的气温观测数据对于更好地理解陆地表面过程和研究全球气温变化等有重要意义^[1]。目前,气温观测数据主要来自地面气象观测站,由距离地面 1.5 m 百叶箱中的温度表测得。因地面气象观测站分布较为稀疏,无法获得高时空分辨率的气温观测数据,故在气象灾害预报、农作物生长监测、数值天气预报等领域的应用受到限制^[2-4]。相对于地面气象观测站,卫星观测具有更好的空间覆盖优势,能获得大范围空间上连续的地表和大气气温信息^[5],也具有时间连续性^[6],因此,卫星观测数据被广泛应用于气温估算。地表温度估算的主要方法有单通道地表温度反演算法、劈窗地表温度反演算法等。不同算法以及不同参数的应用会使气温估算结果差异较大,在既

往基于地表温度(LST)的卫星业务产品估算气温研究中,地表温度的观测偏差对气温估算模型影响较大,无法获得相对准确的气温估算结果^[7]。气温与地表温度、植被覆盖指数(NVI)、海拔等之间有密切的关系。柯灵红等^[8]通过建立基于海拔—温度回归关系的空间重建模型,对 MODIS 地表温度影像的异常值、低值像元进行了重建,重建后的地表温度数据与最高气温保持了较好一致性,该模型可以用于特定条件下的青藏高原地区的气温估算;闫娜等^[9]用 MODIS 合成产品数据,基于地表温度及植被覆盖指数等因素建立线性回归模型,用于进行陕西地区的气温估算和旱情监测。

综上所述,利用卫星产品反演气温具有一定优势,加入影响气温的因子建立估算模型具有一定的可行性。榆林市是陕西省第二大“粮仓”,气

收稿日期:2023-10-23

作者简介:李姗姗(1993—),女,汉族,陕西吴堡人,硕士,工程师,从事天气预报研究。

通信作者:薛小宁(1986—),女,汉族,陕西吴堡人,硕士,高级工程师,从事天气预报研究。

基金项目:秦岭和黄土高原生态环境气象重点实验室开放基金课题(2021Y-9)

温预报的准确性对于农业良好发展具有重要意义。因受地面气象观测站点分布不均的影响,在榆林地区既往的气温预报业务中,气温预报误差往往较大,气象服务质量急需提升。作为新一代静止气象卫星,FY-4A 具有高时空分辨率和高精度的数据产品^[10-13],因此被广泛运用到各类气象研究中。为了去除大气影响,卫星 LST 产品处理过程涉及大气校正、地表发射率估算、辐射传输模型应用等多个步骤,受大气条件的复杂性和地表发射率的不确定性影响,LST 产品的反演精度往往受到一定限制。而亮温产品处理过程相对简单,虽然也无法消除大气对地表辐射的衰减和散射作用,但可以用于快速监测地表热辐射的变化趋势,常用于城市热岛效应等领域的研究。基于以上研究基础,利用 FY-4A 的 1 级亮温产品、2 级云检测产品,地面气象观测站小时气温数据、经纬度、海拔等,构建晴空条件下的神经网络气温估算模型,同时对模型估算效果及误差进行统计分析,实现利用 FY-4A 卫星亮温估算陕西榆林地区气温的目的,以为榆林灾害性天气预报和防御提供参考。

1 研究区域概况与资料来源

1.1 研究区域概况

陕西省榆林市地处 $36^{\circ}57' \sim 39^{\circ}35' \text{N}$, $107^{\circ}28' \sim 111^{\circ}15' \text{E}$ 。该地区地形多样,地势由西向东倾斜,西南部平均海拔 1 600~1 800 m,其他各地平均海拔 1 000~1 200 m。最高点是定边南部的魏梁,海拔 1 907 m;最低点是清涧无定河入黄河口处,海拔 560 m。地貌分为风沙草滩区、黄土丘陵沟壑区、梁状低山丘陵区三大类。大体以长城为界,北部属于毛乌素沙漠的南缘风沙草滩区,面积约 15 813 km²,占全市面积的 36.70%;南部是黄土高原的腹地,沟壑纵横,丘陵梁交错,占全市面积 51.75%;梁状低山丘陵区主要分布在西南部白于山区一带无定河、大理河、延河、洛河的发源地,面积约 5 000 km²,占全市面积 11.55%。

1.2 资料来源

研究所用资料包括:2020 年 1 月 1 日—10 月 31 日由气象大数据云平台天擎网站 (<http://10.172.64.135:8088/cmadaas/>) 下载的榆林市地

面气象观测站(195 个站点,含城区、红石桥乡、人工增雨雪基地国家站)经质量控制后的逐小时气温、经纬度、海拔,儒略日,小时时间;由国家卫星气象中心网站 (<http://www.nsmc.org.cn/nsmc/cn/home/index.html>) 下载的对应时间的 FY-4A 卫星 12、13 通道 1 级亮温产品数据(分辨率 4 km)、2 级云检测产品数据,剔除自动气象站和 FY-4A 卫星数据缺省时刻的数据,并经过处理得到与地面气象观测站气温数据时空匹配的晴空条件下的亮温数据(单位为 K)。将 7 类数据作为输入参数建立神经网络气温估算模型进行训练和模型优化,最后将模型估算气温结果与地面气象观测站逐小时气温作对比。

2 基于神经网络的气温估算模型

2.1 神经网络构建与估算步骤

神经网络是一种由大量的节点(或称神经元)相互连接构成的运算模型,适合处理非线性的复杂问题,已广泛应用在气象研究领域。本研究使用前馈神经网络(feedforward neural networks)构建气温估算模型^[14]。通常神经网络模型的隐藏层数越多性能越高,但在达到一定层数后,模型的性能不再提高,且因层数多计算时间过长,还易产生过拟合的问题。根据计算分析和交叉检验,本文建立的神经网络气温估算模型为 4 层,即:1 层输入层、1 层输出层、2 层隐藏层,设置隐藏层节点数分别为 10 个和 20 个(图 1)。

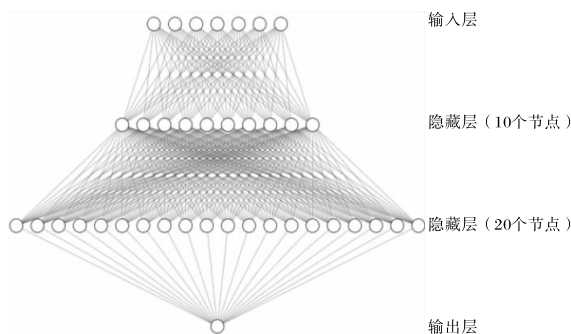


图 1 榆林神经网络气温估算模型拓扑图

气温估算模型由 3 个模块组成。(1)数据提取模块。一是将 FY-4A 卫星 12、13 通道的亮温产品叠加云检测产品(CLM=3)得到晴空条件下的亮温数据(简称晴天亮温)。二是将地面气象观

测站小时气温经处理得到与晴天亮温时空匹配的气温数据。方法是首先遍历卫星数据的每个像元,将地面气象观测站经纬度与其经纬度进行比较,判断地面气象观测站是否落在像元($4\text{ km} \times 4\text{ km}$)范围内。若匹配中出现多个地面气象观测站落入同一像元区域内,则取其平均气温作为该像元区域内的地面气象观测站气温。(2)模型构建模块。利用从数据提取模块得到的奇数天的晴天亮温数据和奇数天的地面气象观测站小时气温等其他 6 类辅助数据作为模型输入,气温估算结果作为输出,建立气温估算模型。为了对比不同输入对模型气温估算结果的影响,构建了 6 个不同输入参数的神经网络模型。(3)模型验证模块。将剩余的偶数天晴天亮温数据和偶数天的地面气象观测站小时气温等其他 6 类数据输入气温估算模型,完成模型的参数优化;用经训练和测试优化后的模型开展气温估算,与地面气象观测站小时气温作对比,评估模型精度。

2.2 评估方法

将地面气象观测站实测小时气温作为标准值,用模型输出的气温估算结果与之对比,检验评估气温估算结果,指标主要为相关系数 R 、均方根误差以及偏差。

2.3 气温估算模型结果

2.3.1 基于不同参数组合的神经网络模型气温估算结果对比

在建立神经网络模型时,输入不同参数组合得到的气温估算结果可能会存在较大差异。为了分析输入参数对模型气温估算精度的影响,设立 6 组实验,将输出的气温估算结果与地

面气象观测站实测气温进行对比,如表 1 所示。模型 1 仅用晴天亮温、站点小时气温作为输入参数,得到的气温估算结果与地面气象观测站实测气温的相关程度有限。模型 2 增加了儒略日,估算结果与地面气象观测站实测气温的相关程度较低。模型 3 增加儒略日、小时时间,建立的神经网络模型能够更准确地表示时间的连续性,使神经网络模型可以更好地捕捉气温随时间的变化趋势,提高模型的估算能力,并且避免了一些日期表示方法中可能存在的歧义和误差,进一步提高了气温估算精度。相较于模型 3,模型 4 的相关系数、均方根误差、偏差分别提升 0.08 、 $0.08\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $0.17\text{ }^{\circ}\text{C}$,说明经纬度信息输入神经网络模型后,反映了不同地理位置的气温存在差异,将榆林地区气温估算结果与其地理位置联系起来,提高气温估算精度。相对于模型 4,模型 5 的相关系数、均方根误差、偏差分别提升了 0.01 、 $0.14\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $0.02\text{ }^{\circ}\text{C}$,说明加入海拔信息对神经网络模型提升气温估算精度的效果不明显,但随着海拔高度的增加气温会逐渐降低,海拔在一定程度上能够反映地形和地貌特征对气温的影响,加入海拔信息可以使模型更好地把握榆林地区的地形和地貌对气温的影响,从而提高估算精度。模型 6 在模型 5 的基础上增加匹配了 FY-4A 卫星的 2 级云检测产品 $\text{CLM}=2$ (可能晴空),虽然其对模型精度影响不大,但由此增加了神经网络模型的训练样本数量,从而提升神经网络模型的气温估算精度。综上,模型 6 估算结果最优,本文选择模型 6 作为研究模型。

表 1 基于不同参数组合的神经网络模型气温估算结果评估

模型	输入参数	相关系数	均方根误差/ $^{\circ}\text{C}$	偏差/ $^{\circ}\text{C}$
1	晴天亮温,站点小时气温	0.46	6.35	1.69
2	晴天亮温,站点小时气温,儒略日	0.64	4.77	1.23
3	晴天亮温,站点小时气温,儒略日,小时时间	0.85	2.23	0.94
4	晴天亮温,站点小时气温、经纬度,儒略日,小时时间	0.93	2.15	0.77
5	晴天亮温,站点小时气温、经纬度、海拔,儒略日,小时时间	0.94	2.01	0.75
6	晴天亮温,站点小时气温、经纬度、海拔,儒略日,小时时间,FY-4A 卫星云检测产品 $\text{CLM}=2$	0.95	1.89	0.74

2.3.2 模型的气温估算结果分析 图2为2020年1月1日—10月31日榆林神经网络模型的气温估算结果与地面气象观测站实测气温的散点图。由图2可知,气温估算结果和实测气温的相关系数、均方根误差、偏差分别为0.93、2.10℃和0.20℃。95%以上的气温估算误差小于5.00℃,90%以上的气温估算小于2.00℃。气温估算结果与实测气温较为吻合的区域主要集中在20.00~30.00℃之间。

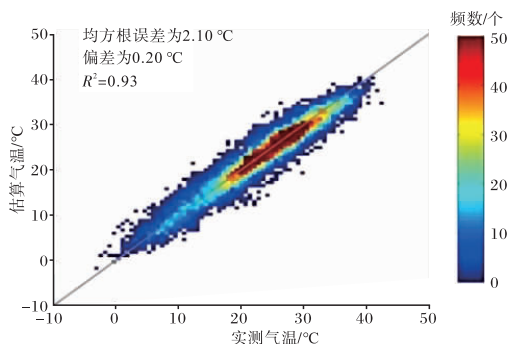


图2 榆林神经网络模型气温估算结果与地面气象观测站实测气温散点图

图3是神经网络模型气温估算结果与地面气象观测站实测气温的相关系数、均方根误差和偏差空间分布图。图3显示,气温估算结果与实测气温的相关系数主要集中在0.50至0.85,未出现明显因地理特征变化导致的估算误差,整体分布较为均匀。东北部地区地面气象观测站分布较为稀疏,气温估算结果与实测气温的相关系数大于0.70的占60%以上;东南部地区地面气象观测站分布较为密集,相关系数在0.60~0.80的占76%;西部地区相关系数集中在0.60~0.70。西部地区气温估算结果较东部地区较差,可能由地形因素造成的。气温估算结果与实测气温的均方根误差范围为1.00~4.00℃,其中东北部地区的均方根误差80%以上都集中在1.40~2.50℃;东南部地区的均方根误差69%以上都集中在1.80~2.80℃,估算效果不如东北部地区好;西部地区的均方根误差73%以上集中在1.70~2.10℃。气温估算结果与实测气温的偏差在-2.00~2.00℃的占总样本的80%,没有明显的区域差异性。因此,该模型输出的气温估算结果基

本能反映地面气象观测站分布较稀疏地区的气温,可满足榆林地区气温的高空间分辨率探测需求。

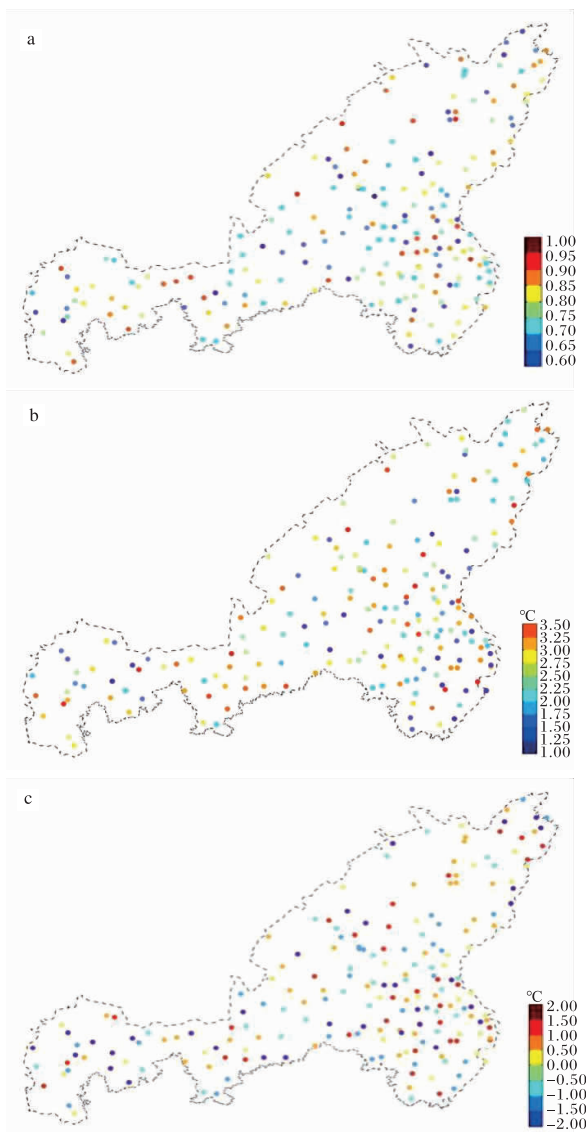


图3 榆林气温估算结果与地面气象观测站实测气温的相关系数(a)、均方根误差(b)及偏差(c)空间分布图

(审图号 G5(2022)1873 号,下同)

神经网络模型的气温估算结果与地面气象观测站实测气温吻合度较好,尤其是东北部和西部地区,但东南部地区比东北部地区误差大。分析原因可能与站点分布情况、地形复杂程度、地面粗糙度等因素对气温估算的影响有关。此外,通过对地面气象观测站实测数据分析发现,榆林地区东北部昼夜温差变化幅度小于东南部,鉴于榆林地区城市建筑的密集程度不同,可能是由城市热

岛效应导致。

2.3.3 不同时段估算气温与实测气温的对比分析 考虑晴空条件和数据完整性等因素,选择2020年1月3日的00、06、12、18时来检验神经网络气温估算模型对一天中不同时段气温的估算情况。由图4可知,00时神经网络模型气温估算结果最高为0.00℃,最低为-17.00℃,与实测气温对比,平均相关系数、均方根误差、偏差分别为0.89、1.80℃、1.94℃;06时气温估算结果最高为-1.00℃,最低为-8.00℃,与实测气温对比,平均相关系数、均方根误差、偏差分别为0.85、2.80℃、3.64℃;12时气温估算结果最高为0.00℃,最低为-12.00℃,与实测气温对比,平均相关系数、均方根误差、偏差分别为0.93、0.83℃、1.04℃;18时气温估算结果最高为1.00℃,最低为-14.00℃,与实测气温对比,平均相关系

数、均方根误差、偏差分别为0.91、1.27℃、1.38℃。综上可知,气温估算模型对12时和18时的气温估算精度较高,00时、06时有所下降,06时最低气温估算结果较实测气温高了6.00℃。亮温是根据传感器接收到的物体的热辐射信号直接转换成的,大气中水蒸气、二氧化碳等气体分子以及气溶胶、云粒子等对地表辐射信号产生吸收和散射的作用,改变了辐射信号的强度和方向。即便在06时太阳辐射开始增强,但大气条件(如湿度、云厚度等)仍对辐射信号产生显著影响,导致卫星接收到的亮温偏高。同时,亮温估算气温若未进行大气校正,也影响了神经网络模型输入数据质量。因此,在用卫星数据估算地表温度或气温时,除需考虑榆林区域的地表辐射率外,还需结合大气的时空分布特征进行分析(主要为水汽含量的分布)^[15]。

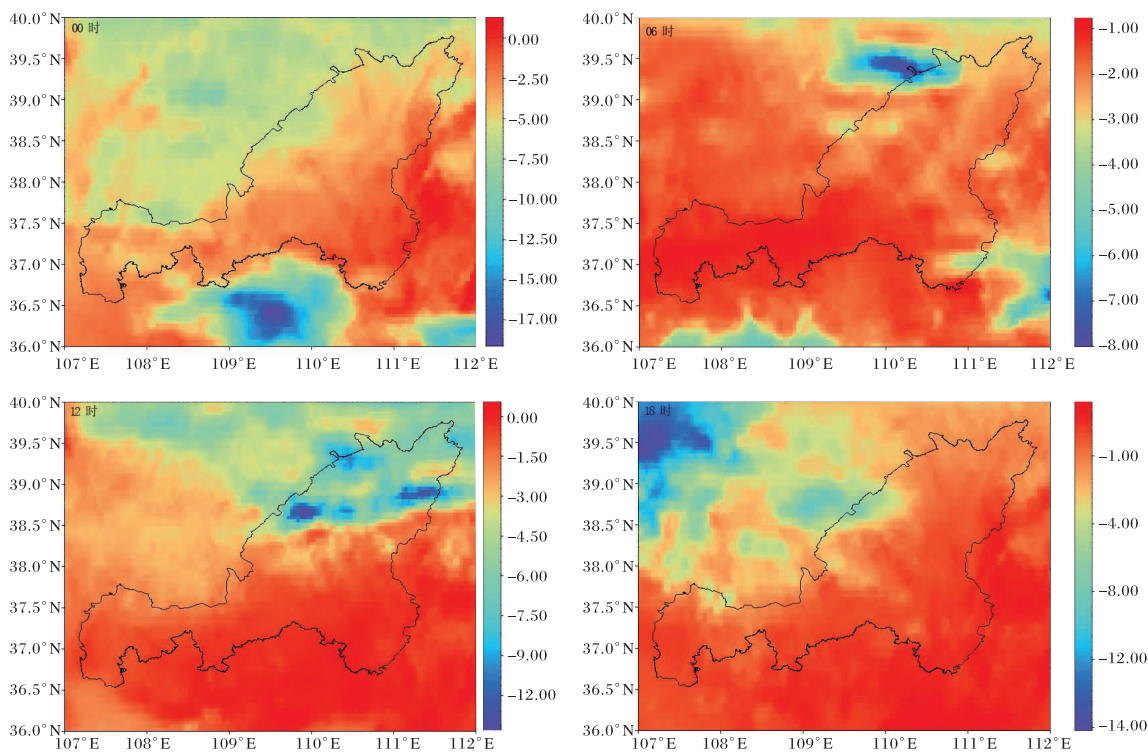


图4 2020年1月3日4个时段榆林神经网络模型气温估算结果(单位:℃)

2.3.4 月累计误差分析 利用模型对每个月累计的误差进行分析和订正,以此来降低模型在后续月份的气温估算中误差增大的可能。基于时序逐站点计算出气温估算结果和实测月平均气温的绝对误差。通过将2020年1—10月气温估算结

果与实测气温对比检验分析得知,1—2月(代表冬季)、3—5月(代表春季)、6—8月(代表夏季)、9—10月(代表秋季)气温估算结果与实测气温的绝对误差小于3.00℃的站点占比平均分别达到了75.2%、79.7%、80.8%、80.6%。由此说明,

估算气温与实测气温的绝对误差小于 $3.00\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的站点占比从冬季到夏季在逐渐增加,整体的气温估算准确性随气温升高而提高。其中,夏季气温估算结果与实测气温的吻合度最高。可能因为榆林地区夏季气温变化最为稳定,模型的估算准确性最高。春季、秋季的吻合度也比较高,说明这两个季节气温估算相对准确。而冬季,气温估算结果与实测气温吻合度最差。综上可知,神经网络估算模型在冬季优化的空间最大,后续可以开展针对低温估算的模型优化研究。

3 结论与讨论

(1)建立神经网络气温估算模型时,不同组合的输入参数对气温估算的精度影响较大,针对榆林地区,输入参数为晴天亮温,站点小时气温、经纬度、海拔、儒略日,小时时间,以及 FY-4A 卫星云检测产品 $\text{CLM}=2$ (可能晴空),模型估算结果最优。不同云检测集对模型的估算精度影响虽然较小,但由此增加符合条件的训练样本,可以提升模型估算精度。

(2)基于最优估算模型的 2020 年 1—10 月榆林地区气温估算结果与实测气温的相关系数在 0.50 到 0.85 区间,相关系数大于 0.70 的站点占 60%以上,偏差分布较为均匀,神经网络模型估算气温与实测气温的均方根误差小于 $3.00\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的样本占 80%以上。该模型可以满足对榆林地区的气温估算,尤其是弥补地面气象观测站分布较稀疏区域的气温预报,促进气温预报准确率及气象服务质量的提升。

(3)模型在 12 时和 18 时的估算精度较高,00 时和 06 时估算精度有所下降。06 时最低气温估算结果较实测气温偏高 $6.00\text{ }^{\circ}\text{C}$,说明地表热量扩散和大气层结时空分布特征会影响模型的气温估算结果。下一步考虑将水蒸气、二氧化碳、云粒子类型、云厚度等影响地表热辐射信号的因素作为气温估算模型的输入参数,同时用大气校正模型对亮温进行处理,以便减小大气对热辐射信号的影响,进一步提升模型估算气温的精度。

(4)模型在不同季节对气温估算的精度存在差异,冬季和春季估算结果不如夏秋两季。为了更精准地估算气温,气温估算模型在输入数据时

还应该考虑季节因素。比如,可以将季节的分类变量或者表示时间变化的周期性变量作为输入参数,以帮助模型更好地捕捉气温随季节的变化规律,从而提高气温估算模型的精度。

(5)榆林地区下垫面类型多样,有森林、草地、沙地、水体、城市等,不同类型下垫面具有不同热容量和热导性,市区地表由于建筑材料的高导热率和低比热容,温度变化较快,将直接影响地表对太阳辐射的吸收、存储和辐射的重新分配,进而对气温造成影响。因此,在后续的研究中可以将下垫面类型作为神经网络模型输入,有助于更准确地模拟地表与大气之间的相互作用,使得模型更好地适应不同区域的实际情况,提高模型的泛化能力。

参考文献:

- [1] 徐伟燕,孙睿,金志凤,等. 基于 MODIS 数据的近地表气温估算[J]. 气象与环境科学,2015,38(1): 1-6.
- [2] 韩秀珍,李三妹,窦芳丽. 气象卫星遥感地表温度推算近地表气温方法研究[J]. 气象学报,2012,70(5):1107-1118.
- [3] 陈锋锐,崔伟宏,彭光雄,等. 融合多源信息的地表气温插值研究[J]. 中国图象图形学报,2011,16(9):1708-1715.
- [4] 易桂花,张廷斌,何奕莹,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.
- [5] 王萌,武胜利,郑伟,等. 长时间序列卫星遥感渤海海冰时空分布特征及与气温关系分析[J]. 气象,2016,42(10):1237-1244.
- [6] 彭继达,张春桂. 基于卫星遥感的福州市近 10 年城市热岛效应时空特征分析[J]. 陕西气象,2022(1): 72-76.
- [7] 周纪,李京,赵祥,等. 用 HJ-1B 卫星数据反演地表温度的修正单通道算法[J]. 红外与毫米波学报,2011,30(1):61-67.
- [8] 柯灵红,王正兴,宋春桥,等. 青藏高原东北部 MODIS 地表温度重建及其与气温对比分析[J]. 高原气象,2011,30(2):277-287.
- [9] 闫娜,李登科,杜继稳,等. 基于 MODIS 产品 LST/NDVI/EVI 的陕西旱情监测[J]. 自然灾害学报,

- 2010,19(4):178-182.
- [10] 董瑶海. 风云四号气象卫星及其应用展望[J]. 上海航天,2016,33(2):1-8.
- [11] CAI X, BAO Y, PETROPOULOS G P, et al. Temperature and humidity profile retrieval from FY4-GIIRS hyperspectral data using Artificial Neural Networks[J]. Remote Sensing, 2020, 12(11):1872.
- [12] LIU R X, LIU J, PESSI A, et al. Preliminary study on the influence of FY-4 lightning data assimilation on precipitation predictions[J]. Journal of Tropical Meteorology,2019,25(4):110-123.
- [13] WANG T,LUO J,LIANG J, et al. Comparisons of AGRI/FY-4A cloud fraction and cloud top pressure with MODIS/Terra measurements over East Asia[J]. Journal of Meteorological Research,2019, 33(4):705-719.
- [14] ZHANG D, ZHANG W, HUANG W, et al. Upscaling of surface soil moisture using a deep learning model with VIIRS RDR[J]. ISPRS International Journal of Geo-Information, 2017, 6(5): 130-139.
- [15] 覃志豪, ARNON Karnieli. 用 NOAA-AVHRR 热通道数据演算地表温度的劈窗算法[J]. 国土资源遥感,2001(2):33-42.

《陕西气象》征稿启事

《陕西气象》是国家新闻出版管理部门第一批认定的学术期刊,国内外公开发行人,双月刊,A4开本,国际连续出版物号为 ISSN 1006-4354,国内连续出版物号为 CN 61-1282/P。

本刊是陕西省气象局和陕西省气象学会联合主办的科技型期刊,被《中国学术期刊综合评价数据库》和《中国期刊全文数据库》、“万方数据资源系统数字化期刊群”、《中国核心期刊(遴选)数据库》、《中文科技期刊数据库》、超星“域出版”平台全文收录,四次荣获陕西省科技期刊特色期刊奖,2020、2023年获陕西省科技期刊优秀期刊奖。

本刊重点刊载气象科学技术及生态、信息技术相关领域的最新研究论文和应用成果,交流和推介气象业务及服务的新经验和新做法,介绍有关气象方面重点和热点问题的气象科学研究成果。

本刊欢迎全国气象行业及相关行业的科技工

作者及大专院校师生投稿。对于优秀稿件,特别是有独特视角、创新意识、理论深度和实践指导意义的论文,可以优先刊发,支付优厚稿酬。

来稿要求论点明确,文字精练,条理清晰,数据可靠,图表清楚、简明。论文格式请参考《陕西气象》征稿简则和《陕西气象》文稿修改基本要求及投稿指南,具体请参阅本刊网站(<http://sxqx.alljournal.cn/>)。

投稿渠道:通过本刊网站注册后即可投稿。

联系电话:(029)86163551

电子邮箱:sxqxbj029@163.com

QQ交流群群号:634022951(申请时请说明单位和姓名)

《陕西气象》编辑部

2024年9月20日