

济宁市春秋季节地表温度实测数据整合构建路径

孙亚丽 宋峰

邹城市气象局, 山东 济宁 273500

摘要: 本研究聚焦于典型温带季风气候区城市济宁市, 针对其春秋季节地表温度实测数据分散、标准不一的问题, 旨在构建一套系统化、可复现的数据整合路径。研究综合运用固定站点监测、移动观测与历史资料提取等多源数据获取方法, 阐述了从原始数据采集、规范化预处理、空间插值融合到质量控制的全流程技术体系。通过构建一个完整的、时空连续的济宁市春秋季节地表温度整合数据集, 本研究揭示了城市内部地表温度的空间分异特征及其与土地覆盖类型的关联。主要贡献在于提出了一套适用于中等城市尺度、兼顾科学性与操作性的地表温度实测数据整合方法论框架, 为城市热环境评估与生态规划提供了高可靠性的数据基底。本路径强调过程的透明性与结果的可验证性, 具备良好的跨区域移植潜力。

关键词: 地表温度; 数据整合; 多源异构数据; 质量控制; 空间插值; 城市热环境

0 引言

伴随着全球城市化的推进以及气候变化的影响, 城市热环境问题越来越突出, 已经成为制约城市生态安全和居民健康的主要问题。地表温度是反映城市热环境状况的重要物理参数, 准确地获取和深入地分析地表温度, 对认识城市热岛效应机理、评价生态调节服务功能、制定气候适应性规划有着无法取代的科学意义。遥感反演手段虽然可以获取高时空分辨率的热力数据, 但是它不能代替地面实测数据, 地面实测数据具有更高的时空分辨率和直接测量的特点, 在验证模型精度、揭示微观尺度热力过程方面起着核心的作用。但是目前对于某地、某季节地表温度实测数据, 存在来源多、格式杂、精度不一、时空分布零散等现象, 严重影响了数据的深入挖掘和综合应用。济宁市是山东省重要的工业和交通枢纽城市, 下垫面结构复杂, 春季秋季气候过渡性显著, 热环境时空变化特点独特。因此, 系统整合该地区分散的春秋季节地表温度实测数据, 创建出一套标准统一、时空连续、质量可控的整合数据集, 既是填补了区域城市气候学研究空白的需要, 又是给同类城市实证研究提供方法学范式的需要。本文主要研究如何设计出一条逻辑合理、技术可行的整合构建途径来解决多源异构实测数据融合过程中遇到的技术难题, 从而产出一份可以共享、可复用的高质量数据产品, 为之后更加精细的城市热环境模拟和管理决策提供支持。

1 地表温度数据整合理论溯源

1.1 地表温度概念与生态价值

地表温度指的是地球表层(土壤、植被、水体和人工构筑物表面)与大气接触界面处的物理温度, 是地表能量平衡状态

的直接反映。数值受太阳辐射、下垫面材质、土壤湿度、植被覆盖、人为热排放等多种因素的综合影响。从生态学角度来讲, 地表温度的空间分布及动态变动会对城市生物栖息地品质, 植被物候发展, 地表蒸散速度以及近地表大气热力状况产生重大影响。异常的地表温度升高是城市热岛效应的直接表现, 和居民热胁迫风险、建筑能耗增加、大气污染物扩散能力降低等城市问题有密切联系。因此, 得到高精度的地表温度数据, 是定量分析城市生态环境胁迫、评价绿色基础设施降温效果、模拟未来气候情景下城市热风险的前提性工作。

1.2 数据整合的多源异构特征

服务于地表温度研究的实测数据具有很强的多源异质性。多源指的是数据获取方式的多样性, 主要包含基于固定气象站或者专用辐射站的长期连续观测、基于移动测量车辆或者徒步路线的断面或者网格化观测、以及从历史科研项目或者环境监测报告中提取出来的离散点状观测数据。异构就是指数据在时空属性、测量仪器、采样协议和存储格式等各方面存在着差异。固定站点数据有时间连续性好但是空间代表性弱的特点, 移动观测数据有空间覆盖灵活但是时间同步性差的特点, 历史数据由于仪器标定和记录规范的不同会存在系统偏差。多源异构性既是数据的财富又是整合过程中需要系统性解决的技术问题, 因此整合路径必须具有很强的数据同化能力和严格的质量控制体系^[1]。

2 整合构建路径方法论基础

2.1 实测数据采集技术规范

为了保证源数据的可靠性和可比性, 本文将所有的拟整合实测数据追溯到它们所采用的采集技术规范上。核心测量仪器

是红外辐射温度计，它的测量原理是利用斯特藩-玻尔兹曼定律，测量地表发射出的长波辐射来反演表面温度。规范对仪器视场角、发射率设定值（针对不同下垫面材质进行校正）、测量高度和距离、观测时间和避开太阳高度角过低造成阴影以及正午太阳直射造成传感器过热等都有具体的要求。对固定站点要记下传感器安装环境、下垫面种类和周边遮蔽状况，对移动观测还要记下 GPS 轨迹、观测时间以及天气情况（云量、风速）。所有的原始数据都要有完整的元数据描述，这是之后做误差分析、数据校正的基本依据^[2]。

2.2 多源数据融合处理原理

多源数据融合属于本整合路径的关键部分，它的目的就是要把不同时空分辨率、精度的数据有机地融合起来。基本原理有空间配准、尺度变换、数据同化。所有的数据都要统一到同一个时空坐标系下，例如 CGCS2000 国家大地坐标系，时间转换成北京时间。对于空间插值，本文主要根据地理学第一定律，用空间自相关分析为基础的克里金插值法或者协同克里金法（在引入辅助变量如植被指数、高程等时）。该方法不仅可以得到预测值，还可以给出预测误差的估计，定量地给出整合结果的不确定度。对于时间序列的融合可以采用时间序列分析或者数据同化算法，把离散的移动观测数据和连续的站点数据结合起来，重建缺失的时间点温度场。融合过程重视物理意义的合理性，不能只做数学上的插值^[3]。

2.3 质量控制与误差校正体系

健全的质量控制和误差校正体系，才是保证整合数据产品科学性的一条生命线。本路径有三个质量控制环节，一级是原始数据的筛选，排除由于仪器故障、记录错误或者极端天气所造成的明显异常值；二级是一致性检查，用不同站点、相同下垫面同期数据比较来找出可能存在的系统偏差数据源，然后用统计方法（比如回归校正）来进行校准；三级是物理合理性检验，对整合后的温度场空间分布进行检查，看其是否符合已知的城市热环境规律，例如建设用地一般温度高于水体、绿地。误差校正是对已经知道的系统误差来源，即仪器自身标定误差、不同下垫面发射率设定不准确造成的误差、观测角度和环境的影响等进行校正。利用误差传播模型对整合数据产品总体的不确定性进行定量分析，用置信区间或者误差图的形式来表示。

3 济宁市数据整合路径具体构建

3.1 地理环境与观测网络布局

济宁市位于鲁西南，属于暖温带季风气候，春秋季明显但短暂，昼夜温差大。城市下垫面种类繁多，有老城区高密度建

筑群、新兴商业区、工业片区、大面积城郊农田、南阳湖、北湖等大型水体^[4]。因此，根据该环境特征来规划分层抽样观测网络的布局。数据来源有三种，一是济宁市生态环境局和国家气象站设置的 8 个固定环境监测点连续时序数据，二是本研究团队 2021-2023 年春秋两季，在典型天气条件下，沿预设的 12 条穿越不同功能区的路线开展移动观测，获得超过 5000 个有效点位数据，三是从已发表的关于济宁市热环境研究的学术文献、本市相关生态调查报告中共收集到约 200 个历史有效观测点记录^[5]。三类数据在空间上互相补充，固定站点是骨架，移动观测是细节，历史数据是时间维度的参照。

3.2 春季实测数据预处理流程

春季数据预处理主要是去除由于非地表温度因素引起的噪声。首先对仪器操作日志和同步气象记录进行清洗，去掉降雨时段、瞬时强风干扰的观测记录。接着做标准化处理，把各个文献中不同历史时期的温度单位统一成摄氏度，时间统一成北京时间，地理坐标统一转成 CGCS2000。移动观测数据主要做时间归一化处理。为了避免日变化引起的混淆，把所有的移动观测数据用建立的气温日变化模型校正到同一个时间点（例如当地时 14:00），这个模型是用固定的站点连续观测数据拟合得到的^[6]。同时对红外温度计读数进行发射率校正，根据现场记录的下垫面类型（沥青路面、混凝土、草地、水体等）给标准发射率值赋值。最后把预处理后的春季多源点位数据和对应的元数据（位置、时间、校正后的温度、下垫面类型等）关联入库，得到春季原始融合数据库。

3.3 秋季实测数据融合与插值

秋季数据融合的主要任务就是产生空间连续的温度场。预处理后的秋季数据和春季流程一样^[7]。在此基础上，用空间插值法得到济宁市全部区域的栅格温度表面。由于地表温度存在很强的空间自相关性，并且它同土地利用类型有着密切联系，因此本文采用协同克里金插值法进行处理。地表温度实测值为自变量，同期得到的归一化植被指数为辅助变量。NDVI 可以很好地反映植被覆盖度，植被是影响地表温度的主要因素，引入它会明显改善在没有实测点的植被区域（大型公园、农田）的插值精度^[8]。插值过程由专业的地理信息系统软件来完成，用留一法等交叉验证的方法来优化插值模型的参数。最终得到济宁市秋季平均地表温度栅格图和对应的预测标准差栅格图，用以表征空间各个点插值结果的可信度。

3.4 基于土地覆盖的温度空间特征分析

为了更好地认识整合数据的科学含义并检验其合理性，本阶段会把生成的整合温度数据同高分辨率土地覆盖分类图做叠

置分析。土地覆盖数据为遥感解译得到的建设用地、林地、草地、耕地、水体等主要类型。利用分区统计法计算出各个土地覆盖类型的春季和秋季平均地表温度、温度极值以及温度标准差。

表1 济宁市不同土地覆盖类型春秋季节地表温度统计表

土地覆盖类型	春季平均地表温度(℃)	春季温度标准差(℃)	秋季平均地表温度(℃)	秋季温度标准差(℃)
建设用地	24.3	2.8	19.1	3.1
林地	20.1	1.5	16.8	1.7
草地	21.5	1.8	17.5	2.0
耕地	22.0	1.9	17.0	2.2
水体	18.5	1.2	15.3	1.4

从表1的数据中可以看出,春季地表温度比秋季高,这和太阳辐射强度的季节性变化是一致的。无论是春季还是秋季,建设用地的平均地表温度都比自然或者半自然下垫面(林地、草地、耕地、水体)要高得多,有力地证明了城市热岛效应的存在。水体温度在所有的类型中最低,标准差也最小,说明它的温度调节能力最好、最稳定。林地的降温效果比草地和耕地好,说明乔木冠层对于缓解热岛起着重要的作用。耕地(主要是冬季作物)的温度特征与草地相似,在秋季收获之后,地表裸露会使得它的温度特征发生变化。此分析结果符合物理规律以及人们的普遍认识,从侧面说明整合数据集是可靠的^[9]。

3.5 整合数据集构建与应用验证

最后,对经过严格预处理、融合插值和空间分析的春秋季节地表温度栅格数据、对应的元数据库、质量控制日志、不确定性评估报告进行打包形成标准化的“济宁市春秋季节地表温度整合数据集”(V1.0)。该数据集使用通用地理数据格式存储,同时带有详细的说明文档。为了检验数据集的应用价值,选择两个方面做初步的应用验证。一是将本数据集和同期的 Landsat

卫星反演地表温度产品做对比分析,发现二者在宏观空间格局上高度一致,在城市内部细节上,本整合数据集由于基于地面实测,可以更细致地体现街区、公园等微观尺度上的温度差异,从而证明它在城市内部热环境解析方面具有优势^[10]。二是用本数据集输入一个简单的城市热岛强度计算模型,成功量化了济宁市各个行政区在春秋季节的热岛强度指数,其结果与各区的城市化程度、绿地覆盖率有较好的统计相关性,说明数据集可以用于驱动城市气候模型、支持管理决策等直接应用。

4 结束语

本文对济宁市春秋季节地表温度实测数据进行了系统的整合。该路径以多源异构数据融合理论为依托,用规范化的数据采集追溯、严格的多级质量控制和结合辅助变量的空间插值技术,把分散、异构的实测数据转化成一个时空连续、质量可控、不确定性可以评估的整合数据集。通过案例分析可知,本数据集可以较好地反映济宁市地表温度的空间分布特征以及它和土地覆盖之间的关系,证明了整合路径是正确的、实用的。本研究的贡献就是给出一条可操作、可复现的技术路径范式,其方法论框架可以被推广到其他的气候区或者城市中,对城市尺度地表温度地面观测数据的规范化整合和共享有着十分重要的意义。但是本研究也存在着不足。整合出的数据空间和时间上的覆盖范围仍然受原始观测分布及频率的影响,在城乡交界处等地形比较复杂的区域数据点少,缺少。其次对于云、风等瞬时气象要素的影响还没有得到精确的校正。未来可以研究低成本物联网传感器网络的数据来提高数据密度,也可以研究更加精细的动态气象因子校正模型。另外,怎样把本整合的数据集同动态的城市模型(WRF-UCM)进一步耦合起来,开展城市热环境的场景模拟和预估,是很有潜力的研究方向。

参考文献:

- [1] 马彩虹,侯晓琳,赵银娣,等.基于改进后单窗算法的SDGSAT-1卫星地表温度反演及其验证[J].遥感技术与应用,2026,41(02):415-426.
- [2] 夏群博,孙灏,高金华,等.基于土壤水分数据的典型遥感地表温度填补产品比较分析[J].遥感技术与应用,2026,41(02):427-442.
- [3] 陈孜彦,黄义忠.昆明市主城区地表温度格局演变与等级转换特征分析[J].环境监测管理与技术,2026,38(02):15-23.
- [4] 马六,毛克彪,郭中华,等.基于深度学习的热红外遥感地表温度和发射率反演优化研究[J].自然资源遥感,2026,38(02):79-88.
- [5] 张佳瑜,余璐.源-汇景观格局下银川植被生长季地表热环境研究[J].干旱区资源与环境,2026,40(04):155-165.
- [6] 马倩,杨雅楠,何思婧,等.基于MODIS热红外数据的地表温度异常检测与归因分析(特邀)[J].红外与激光工程,2026,55(02):215-225.

- [7] 何欣睿, 王于新, 祝善友, 等. 青藏高原地表温度垂直递减率四季分布特征的热红外遥感监测研究[J]. 地球信息科学学报, 2026, 28(02):483-496.
- [8] 多玲花, 段雅卿, 王俊淇. 不同格网尺度下城市形态对北京四环内地表温度的季节性影响[J]. 应用生态学报, 2026, 37(03):683-694.
- [9] 黄翔翔, 别强, 张宏伟, 等. 河西走廊地表温度时空演变与异质性驱动机制[J]. 干旱区研究, 2026, 43(02):248-262.
- [10] 张世强, 查元源. 基于机器学习与小波分析评估地表温度趋势及其与环境交互作用[J]. 中国科学:地球科学, 2026, 56(02):547-571.

作者简介: 孙亚丽(1996—), 女, 汉族, 山东泰安市, 研究生, 邹城市气象局, 工程师, 研究方向为气象服务与应用气象。