

中国天山山体效应评估及空间分异归因

张明羽^{1,2}, 张正勇^{1,2}, 刘琳^{1,2}, 张雪莹^{1,2}, 康紫薇³,
陈泓瑾^{1,2}, 高煜^{1,2}, 王统霞⁴, 余凤臣^{1,2}

(1. 石河子大学理学院, 石河子 832000; 2. 绿洲城镇与山盆系统生态兵团重点实验室, 石河子 832003;
3. 中国科学院新疆生态与地理研究所, 乌鲁木齐 830011; 4. 石河子大学水利建筑工程学院, 石河子 832000)

摘要: 山体效应是隆起山地产生的热力效应, 其对山区水热条件格局和生态地理过程有着普遍且深远的影响, 也是山地科学相关研究的突破口之一。本文基于多源遥感数据和气象观测数据进行中国天山气温空间降尺度反演, 开展研究区山体效应估算和时空格局分析, 借助地理探测器及GWR模型探析中国天山山体效应时空异质性成因规律。结果表明: ① 中国天山气温格局复杂多样, 整体呈南高北低、东高西低的分布特征; 气温的地带性特征明显, 且与海拔、内外程度均呈负相关。② 研究区山体增温效应普遍且突出, 同海拔气温由西向东、由北向南均呈阶梯式递增; 大型沟谷和山间盆地等地貌单元削弱了同海拔气温的纬度地带性和海拔依赖性特征, 其中天山南脉、额尔宾及巴里坤等隆起区山体增温效应尤其明显。③ 影响中国天山山体效应整体格局的主导因子为地形及区位, 其中内外程度与高程的贡献突出; 因子间的交互作用对山体效应空间分异的影响大于单一因子, 地形与气候、降水、NDVI等因子的交互作用强烈。④ 主要驱动因子对研究区山体效应空间变化的作用方向及强度存在明显的空间异质性。绝对高程与山体效应强度呈显著正相关, 降水和NDVI则以负反馈作用为主。总体而言, 地形与降水、下垫面等因子耦合形成独特的山地环流系统和气候特征, 进而增强天山山体效应的时空异质性。本文研究结果是对山体效应成因分析及其生态效应研究的有益补充。

关键词: 山体效应; 空间降尺度; 地理探测器; 地理加权回归; 中国天山

DOI: 10.11821/dlxb202305012

1 引言

山体效应是陆表山地隆起或抬升后造成山体同海拔气温内部高于外部的现象, 其引起的水热空间异质性一直是自然地理学研究的经典内容之一^[1-3]。山体隆升引起的增温效应普遍存在, 山体效应不仅改变了区域和山系尺度的地理生态格局^[4], 也会影响生物多样性的分布^[5]。因此, 揭示山体效应异质性及其驱动因子空间非平稳关系的响应格局, 可为丰富山区局地复杂气候变化、资源保育等研究提供依据。1904年德国科学家Quervain在开展阿尔卑斯山生态地理研究过程中, 首次指出自然垂直带界限存在自山体外部向内部逐步升高的现象。山体效应的早期研究也多处于定性对比不同山体内、外植被分布界限的阶段, 且尚不清楚其形成原因与作用机理。随着遥感技术的发展, 山体基面高度作为山

收稿日期: 2023-01-16; 修订日期: 2023-05-05

基金项目: 国家自然科学基金项目(41761108) [Foundation: National Natural Science Foundation of China, No.41761108]

作者简介: 张明羽(1999-), 女, 甘肃张掖人, 硕士生, 主要从事山地气候变化及生态环境研究。

E-mail: zmy_zz1015@163.com

通讯作者: 张正勇(1978-), 男, 甘肃景泰人, 教授, 硕士生导师, 主要从事水文资源及气候变化研究。

E-mail: zyz0815@163.com

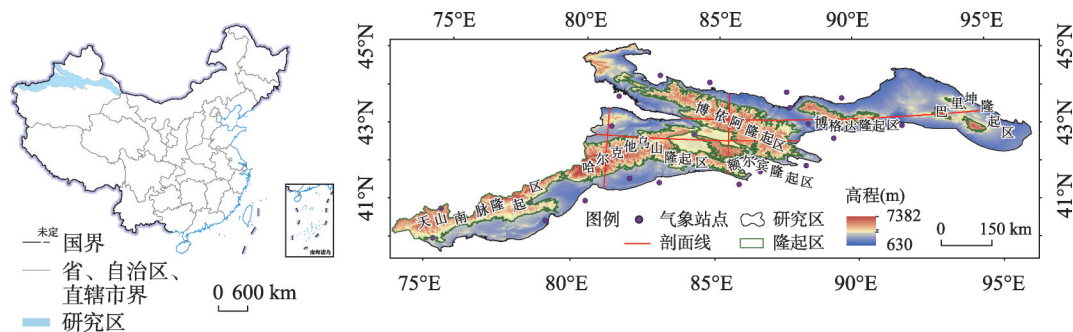
体效应的第一影响要素,被广泛应用于全球和局地尺度山体增温效应的定量化模型构建^[6-7],还与降水大陆度、纬度等因子共同应用于山系/高原尺度的增温效应研究,如青藏高原、安第斯山、阿尔卑斯山、科罗拉多落基山脉、新西兰山地^[8-10]等。以上因子对全球及区域尺度下山体增温效应的解释力高达60%^[11-12],并加快了山体效应的定量化研究,但以上因子只能解释其对山体效应的贡献度,亟待从机理上揭示山体效应的空间异质性及成因复杂性。

山体效应异质性与空间尺度有关,随着研究尺度向局地推进,山体增温强度及成因机制则越复杂^[13]。因山体规模结构、气候环境和下垫面属性等存在明显空间分异,亦会造成山体效应分布格局的多样性和形成机制的区域性^[14]。山体效应是由“隆起地块”对山体自身及周围环境造成的气候效应,同时气候变化对隆起地形的响应研究也具有重要意义^[15-16]。除山体基面高度外,地形地貌的空间异质性也是引起山区内外部温差的关键因素^[17-19];此外,草地、森林、裸岩和冰川等不同下垫面对太阳辐射的反射率有很大差异^[20],加之各气象要素共同参与陆表和自由大气的能量交换,此过程中的热力循环造就山区气温空间分异进而影响山体效应的格局及程度。以往山体效应研究大多通过构建变量间的线性回归模型来审视它们对各山系的作用特点,而这种全局回归模型无法厘清驱动因子对山体效应空间异质性的贡献,也不能表达多因子的联合控制作用。可见,在考虑山体效应内涵及其分布格局存在可能影响的诸多因子的基础上,寻求合适的方法定量探析驱动因子的空间异质性及因子间的协同或拮抗作用,对揭示山体效应的分异规律及成因机制尤为重要。地理探测器^[21](GeoDetector)是度量、挖掘和利用空间异质性的新工具,可客观反映地理现象中各驱动因子的优先级和因子间的联合效应。地理加权回归模型^[22-23](GWR)针对自变量和因变量间的变化关系可实现局部空间回归建模,进而揭示驱动因子的空间异质性^[24]。以上模型所遵循的核心理论优势互补,有助于多视角探讨山体效应对驱动因子的响应机制,以期推进局部山体效应研究领域的深入和拓展。

当前山体效应研究涉及的山系大多分布在低纬或季风气候区,而深居内陆和中纬的天山不仅是全球七大山系之一,也是全球温带干旱区大型山地生态系统的最典型代表。开展天山山体效应强度、格局及成因的定量分析等研究,对于干旱区山体效应特征及其生态效应研究具有重要意义,也有助于更深入和全面的探究不同规模、走向、海陆位置山地山体效应的空间分异规律及作用机理。目前中国天山气温变化相关研究已取得丰硕成果,但大多研究都仅将山峰林立和沟谷密布的天山视为简单的“锥体”,局限了其内外部和不同隆起区气温空间分异格局的表征。因此本文采用多源遥感数据,基于不同时空尺度定量刻画天山山体效应格局及分异规律,并借助地理探测器识别其主导驱动因子,结合GWR模型探析山体效应时空变化与影响因子间的地理空间关系,有助于多维阐释干旱区山地生态地理格局演变,是对现有山地气候乃至山地科学研究的有益补充。

2 研究区概况

天山位于欧亚大陆腹地,不仅是由巨大沙漠夹持的大型纬向山系,也是中亚气候的分界线及内陆水系的发源地和分水岭^[25]。中国境内的天山(简称中国天山)由南天山、中天山、北天山3条平行褶皱山脉组成的巨大复合山链,占整个山系长度的2/3以上^[26](图1)。南天山的汗腾格里山最为高峻,以其为界分为天山南脉和哈儿克他乌山;中天山山势平缓,自西向东包含乌孙山、那拉提山、额尔宾山等,最高峰位于额尔宾山(4835 m, 43.53°N和81.00°E)穿过天山海拔4000 m以上的诸多山系;北天山西段包含博罗科



注：基于自然资源部标准地图服务系统GS(2019)1823号标准地图制作,底图边界无修改。

图1 研究区概况

Fig. 1 Overview of the study area (Tianshan Mountains of China)

努山和依连哈比尔尕山等,东段则包含博格达山和巴里坤山等;中国天山山链间镶嵌着众多山间盆地,如 42.90°N 和 86.00°E ,分别由西向东、由北至南均穿越巴音布鲁克盆地。受其山盆相间的独特地貌、山体走向及山区气流的影响,天山具有明显的大陆性气候、差异巨大的冬夏气温和垂直气温^[27-28]。约4000 m的相对高差为天山地理环境的垂直分异提供了巨大的空间,造成垂直自然带结构在南北、东西方向上均存在明显差异,加之水热条件的分异作用发育了荒漠、山地森林/草原、高山草甸、极高山冰川/积雪带等完整的山地垂直生态系统^[29]。

3 数据与方法

本文基于多源遥感数据进行中国天山气温数据的空间降尺度处理和精度评价,运用数理统计方法和GIS空间分析技术,开展研究区山体效应估算和空间格局分析,借助地理探测器及GWR探究天山山体效应时空分异的成因机制。

3.1 数据采集及预处理

3.1.1 遥感数据 本文所需的遥感数据主要为地温、降水、DEM、NDVI、气压、湿度、风速数据。地温是空间分辨率为 0.05° 的MOD11C3数据,下载自NASA (<https://www.nasa.gov/>),包含白天与夜间数据,经MRT批处理后,借助ArcGIS软件使用算术平均法合成月均地温数据。DEM数据的空间分辨率为30 m,来源于地理空间数据云 (<http://www.gscloud.cn/>)。降水、NDVI、气压、湿度及风速数据空间分辨率均为1 km,NDVI与气压数据源于中国科学院资源环境科学数据中心 (<https://www.resdc.cn/>),其余数据来自国家地球系统科学数据中心 (<http://www.geodata.cn/data/>)。以上数据时间跨度均为2000—2020年,同时为便于栅格计算和统计分析,将所有数据统一至WGS-84坐标系及UTM投影。

3.1.2 实测数据 实地观测数据主要为气象站点数据,下载自国家气象信息中心 (<http://data.cma.cn/>)。考虑到与其他数据在地理位置、高程等的空间匹配性,选取中国天山及周边地区的23个气象站点的实测数据,其中2000—2015年的数据用于驱动气温反演模型,2016—2020年的用于检验遥感数据反演精度。

3.1.3 地形因子提取 地形因子包含海拔、坡度、坡向、地形位指数、地形粗糙度及内外程度等,参考以下方法及公式^[17,30] (表1),借助ArcGIS软件利用DEM数据获取。

表1 气温反演所需的地形参数
Tab. 1 Terrain parameters used in temperature inversion

地形因子	描述	方法/公式
海拔	山地隆起程度	由DEM数据获取
坡度	地表倾斜程度	利用ArcGIS坡度工具获取
坡向	地形坡面朝向	$Trasp = 1 - \cos[\pi(aspect - 20)/180]$
地形位指数	综合反映地形的空间分异特征	$T = \lg\left[\left(\frac{E}{\bar{E}} + 1\right) \times \left(\frac{S}{\bar{S}} + 1\right)\right]$
地形粗糙度	地面粗糙程度	$R = 1/\cos(s)$
内外程度	距大地形边缘的距离	ArcGIS距离分析

注：Trasp为坡向转换指数，aspect为坡向；T为地形位指数，E及 \bar{E} 代表高程及高程平均值，S和 \bar{S} 代表坡度和坡度平均值；R为地形粗糙度。

3.2 研究方法

3.2.1 气温降尺度模型构建 以往研究显示地温与气温间存在显著相关性^[31]，近地表陆面与自由大气间能量交换过程受地物和环境等多种要素的综合影响^[32]。气象站稀少不利于山区气温的空间表达，而遥感类数据可解决空间连续性问题，但其分辨率限制了对气温分布的精细和客观评估。为此本文选用与气温相关性较高的MOD11C3地表温度数据作为反演气温的基础数据^[33]，参考前人研究并结合可表征山区地理位置、地形和环境等条件，综合选取经度、纬度、海拔、坡度、气压、湿度、风速及NDVI等因子，构建气温空间降尺度回归模型（式（1））。采用决定系数（ R^2 ）、均方根误差（RMSE）及偏差（Bias）等综合评估降尺度反演所得气温数据与实测气温数据的一致性^[34]。

$$y = ax_1 + bx_2 + cx_3 + dx_4 + ex_5 + fx_6 + gx_7 + hx_8 + jx_9 + \lambda \quad (1)$$

式中：y为实测气象站点数据； λ 为常数； x_1 为海拔； x_2 为坡度； x_3 为经度； x_4 为纬度； x_5 为地温； x_6 为气压； x_7 为风速； x_8 为湿度； x_9 为NDVI； $a \sim j$ 分别为自变量的回归系数。

另外，后续研究中为实现区域气温的精细表达，还需提取和衍生降尺度所需的栅格数据。首先将DEM（30 m）的空间分辨率定义为高分辨率（HR），LST（0.05°）和气象因子（1 km）的空间分辨率定义为低分辨率（LR）。然后提取LR尺度下气象站点对应的气象、地理和地形因子，构建气温降尺度回归模型并得到因子回归值，将LR中得到的回归系数代入HR因子数据中，借助ArcGIS构建高分辨率的天山气温数据库。

3.2.2 山体效应估算 以往山体效应量化多用山体内外部的同海拔温差表征^[35]，但由于中国天山大部分山体被广袤沙漠所夹持，外围荒漠戈壁区域的气温远高于植被覆盖度较高的山区，不宜采用同纬度的山体内外部温度差异表征山体效应强弱，加之山系内部又分布较大面积“凹陷”的山间盆地。因此，本文主要从不同隆起地块与山体其他区域、山体内部与外缘的同海拔气温差异来衡量山体的宏观和细部增温效应特征。本文参照前人的研究方法^[16, 36]，将研究区气温统一转换至中国天山平均海拔（2216 m）的气温：

$$T_{ah} = T_a + (E - H) \times \partial \quad (2)$$

式中： T_{ah} 为海拔h上的气温； T_a 为反演所得气温；E为当前位置的海拔高度；H为研究区的平均海拔； ∂ 为气温垂直递减率，本文采用的平均垂直递减率为0.6 °C/100 m。

为了展示天山各隆起区与山区整体的增温幅度的细部差异，选取几乎贯穿了研究区典型地貌单元的42.90°N、43.53°N、81.00°E和86.00°E等4条剖面线，它们可具体分析山体效应随经纬度的变化趋势及其与山地隆起程度和内外程度的相关性。

3.2.3 地理探测器 本文构建了包括3大类一级指标和8个二级因子的指标体系（表2），借助地理探测器探究中国天山不同时间尺度山体效应空间分异的成因规律，采用因子探测模块检验各因子对山体效应时空分异格局的解释力，采用交互探测模块识别各因子间的耦合方式及其对山体效应空间分异的影响强度，公式如下：

$$q=1-\frac{\sum_{h=1}^L N_h \sigma_h^2}{N \sigma^2}=1-\frac{SSW}{SST}$$

(3)

式中： q 表示自变量对山体效应空间异质性的解释力，值越大解释能力越强； $h=1, 2, 3, \cdots, n$ ； L 为变量 Y 或因子 X 的分层，即分类或分区； N_h 和 N 分别为层和全区的单元数； σ_h^2 和 σ^2 分别是层 h 和全区的 Y 值的方差； SSW 和 SST 分别为层内方差和全区总方差。

表2 中国天山山体效应空间分异影响因子

Tab. 2 Spatial differentiation influencing factors of mass elevation effect in the Tianshan Mountains of China

因子类型	地形及区位因子					气象因子	下垫面
具体指标	坡度(X_1)	坡向(X_2)	内外程度(X_3)	地形位指数(X_4)	地形粗糙度(X_5)	绝对高程(X_6)	降水(X_7) NDVI(X_8)

3.2.4 地理加权回归 地理加权回归模型是基于局部光滑思想提出的空间回归模型，GWR根据不同的地理空间划分单元得到局部回归系数，既能有效估算具有空间自相关性的数据，也能反映驱动因子在不同区域的空间异质性^[37-38]。本文使用GWR探究主要驱动因子在各地理空间单元内的影响力及在作用方向和强度上的差异。其公式如下：

$$y_i=\beta_0(u_i,v_i)+\sum_{k=1}^p\beta_k(u_i,v_i)x_{ik}+\varepsilon_i\quad (i=1,2,3,\cdots,n)$$

(4)

式中： y_i 为栅格 i 的因变量值； β_0 为截距； (u_i, v_i) 为栅格 i 的坐标； $\beta_0(u_i, v_i)$ 为栅格 i 的常数项； $\beta_k(u_i, v_i)$ 为栅格 i 的第 k 个自变量的系数； x_{ik} 为栅格 i 的第 k 个自变量； ε_i 为随机误差。

4 结果分析

4.1 中国天山气温时空格局

中国天山地形起伏大且山峰和谷底相间等结构特征造成了气温格局的多样性和复杂性。研究区（图2）全年、夏半年和冬半年均温分别为2.6℃、11.5℃和-6.2℃，从经度、纬度、海拔及内外程度等视角分析发现，中国天山气温时空分布整体呈东西高中部低、边缘高内部低的环状分布格局，由外部至内部呈“V”型特征。经向84°E附近分布的天山第二大山结—依连哈比尔尕山广布的大规模冰川存在大范围气温低值区，造成该节点东、西段气温在冬、夏半年呈相反的分格局（图3a）。研究区气温纬度地带性特征较明显（图3b），不同纬度带受山地地形影响气温递减速率不一，冬半年42°N以北气温出现升高的趋势。

海拔在山区的气候变化中起着关键作用。由于不同时期空气干湿度及接受辐射差异等造成夏半年垂直递减率最大，而冬半年仅为0.55℃/100 m（图3c）。研究区夏半年由外围边界至内部腹地的降温速度高达1.39℃/10 km，冬半年约以1.03℃/10 km递减。冬半年天山普遍存在强度大、频率高、厚度大且高达2000 m的逆温现象^[26]，这不仅造成垂直

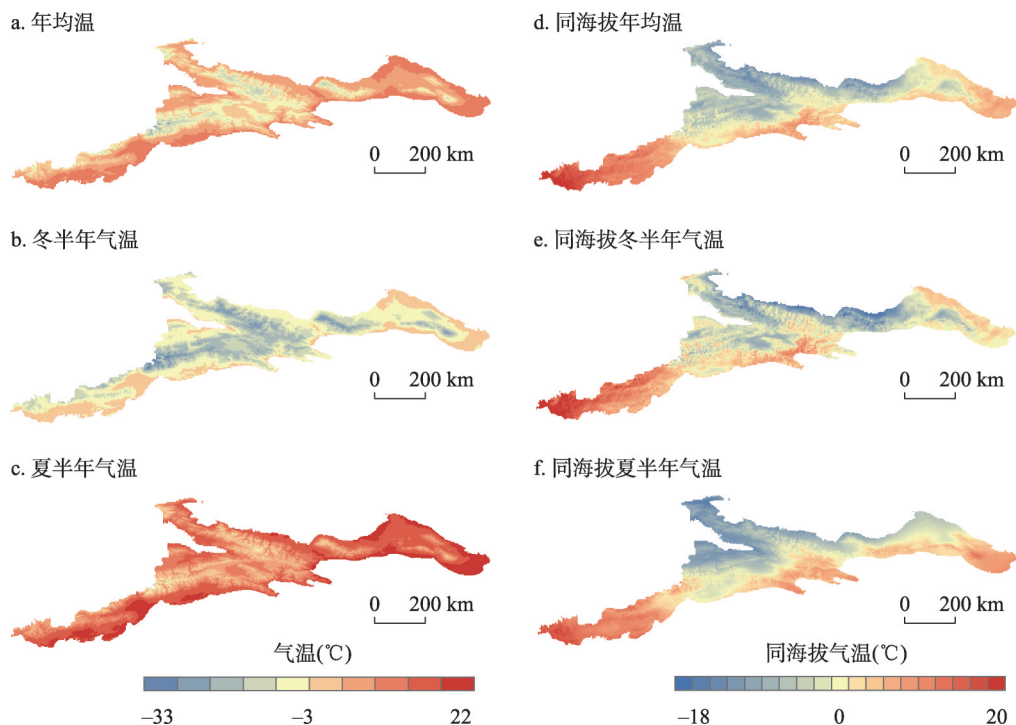


图2 中国天山气温、同海拔气温空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of annual average, summer and winter temperature in the Tianshan Mountains of China

递减率偏低, 还造成距边界 100 km 的腹地出现增温趋势 (图 3d)。整体来看, 中国天山气温空间分布地带性特征较为明显, 同时夏半年内外温差大于冬半年。

4.2 中国天山山体效应时空格局

4.2.1 宏观格局分析 中国天山的气候变化和下垫面属性 (如植被和积雪覆盖度) 均存在明显的季节性规律^[39]。有必要基于不同时间尺度的同海拔气温格局探讨山体效应的空间分异特征, 同时由于天山山系是由众多山脉组合而成, 为能更具体识别不同隆起地块的增温效应, 结合研究区地貌构造特征将其归并为 6 大隆起区: 天山南脉隆起区、哈尔克他乌山隆起区、额尔宾隆起区、博罗科努山—依连哈比尔尕山—阿拉沟山 (简称博依阿隆起区)、博格达隆起区及巴里坤隆起区。

基于逐月同海拔气温, 得出年均、冬半年及夏半年的山地同海拔气温空间分布格局 (图 2)。与实际气温相比, 研究区同海拔气温随经度变化更为复杂, 纬度地带性变化更具规律性。山区同海拔气温经向 (由西向东) 总体呈降低特征, 局地各时段又出现不同程度的升温 (图 3e); 同海拔气温的纬度地带性特征明显, 且各时段递减速率远小于同期实际气温的变化 (图 3f)。3 个时期在 39~40°N、42°N 及 44~45°N 处均出现不同程度的增温, 以上区域分别对应分布有天山南脉隆起区、哈尔克他乌山隆起区与阿拉套山等。与此同时, 隆起地块不仅造成天山同海拔气温的垂直递减率呈微弱递增趋势 (图 3g), 还缩小由内外海拔差异造成的内外温差 (图 3h), 但隆起区变化大于天山整体。如夏半年同海拔气温垂直递变率最快的巴里坤隆起区高达 0.15 °C/100 m, 高于同期的天山 5 倍; 夏半年同海拔气温降温速率仅为 0.096 °C/10 km, 而同期的哈尔克他乌山与依连哈比尔尕山内外温差在 1.5~2 °C, 靠近内部山顶区分布的大量冰川导致同海拔气温不再升高^[40]。

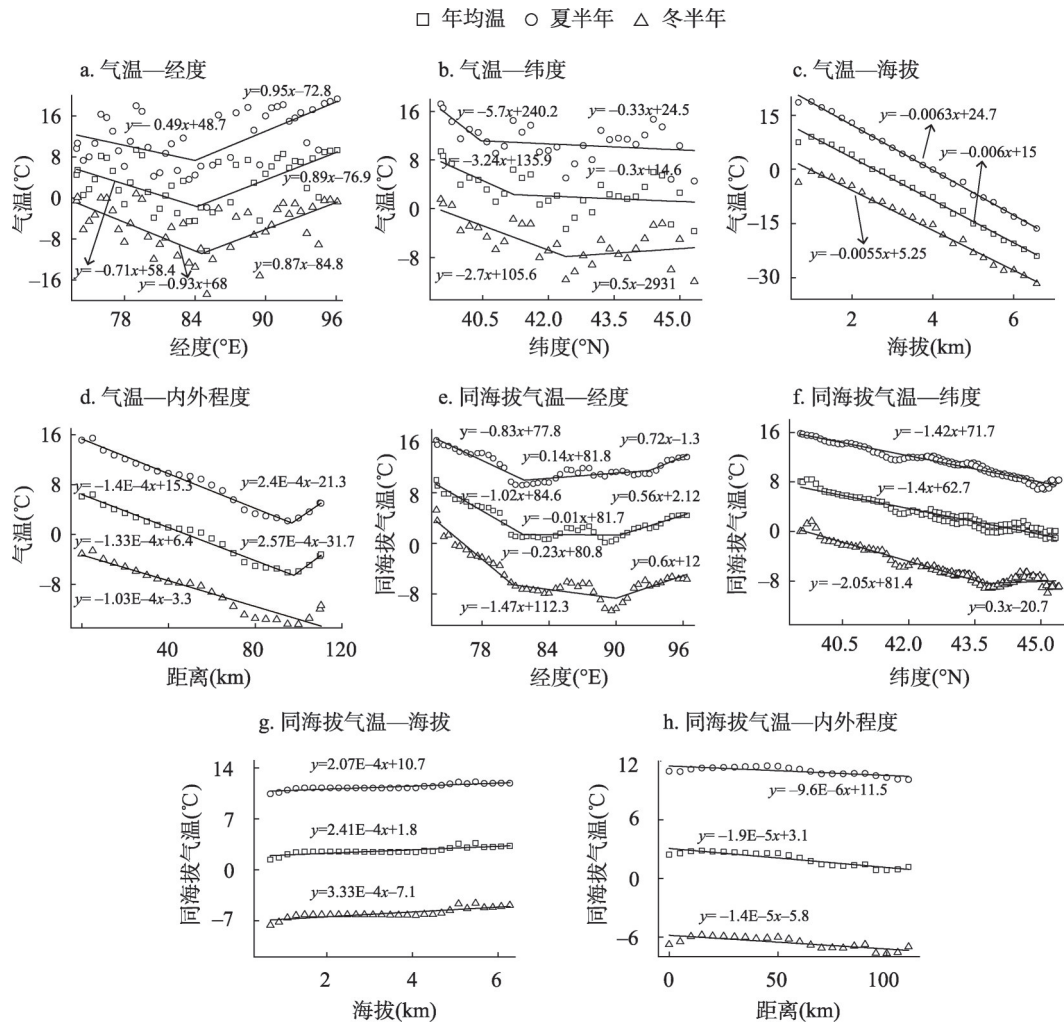


图3 中国天山气温、同海拔气温变化特征

Fig. 3 The variation characteristics of temperature and temperature at the same altitude in Tianshan Mountains of China

进一步对6个隆起区与同纬度的同海拔气温差值(表3)比较发现,虽有2个隆起区分别在冬、夏半年没有明显增温现象,但整体上中国天山山体增温效应显著而普遍,且时空差异明显。其中天山南脉隆起区、额尔宾隆起区和巴里坤隆起区是研究区年尺度山体效应最突出的构造单元,而夏半年哈尔克他乌山隆起区和冬半年的博格达隆起区山体效应不显著。山体效应宏观上由西向东呈先降低后升高的趋势,各隆起区中天山南脉、额尔宾及巴里坤隆起区是山体效应最显著的区域,天山整体和局部的差异也证明山体增温存在区域性差异。

综上所述,中国天山同海拔气温地带性特征明显且时空差异显著,连续性大型沟谷和山间盆地等地貌单元削弱了其地带性分布规律,同海拔气温垂直变化呈微弱升高趋势。

4.2.2 细部特征分析 中国天山山体效应的时空分异特征明显,同时各隆起区与山区整体的增温幅度不尽相同,因此有必要进一步探究不同地貌单元和不同时间尺度(冬半年和夏半年)山体效应的细部特征。

表3 中国天山各隆起区同海拔气温分布统计

Tab. 3 Statistics on the distribution of temperature at the same altitude in each uplift area in the Tianshan Mountains of China

隆起区	平均海拔(m)	夏半年		冬半年	
		平均温度(℃)	与同纬度均温差(℃)	平均温度(℃)	与同纬度均温差(℃)
天山南脉隆起区	3189	14.49	0.85	-0.70	1.72
哈尔克他乌山隆起区	3311	11.08	-0.31	-6.19	0.10
额尔宾隆起区	3494	12.34	0.86	-5.04	1.33
博依阿隆起区	3135	10.80	0.29	-7.01	0.46
博格达隆起区	3080	11.57	1.32	-9.81	-1.48
巴里坤隆起区	3473	13.37	2.94	-6.64	1.21

42.90°N剖面线(图4a、4b)所穿过的哈尔克他乌山隆起区和额尔宾隆起区较巴音布鲁克盆地区冬、夏半年同海拔气温的增幅分别在3.9℃和3.3℃左右。43.53°N剖面线(图4c、4d)所穿的博格达隆起区较依连哈比尔尕山冬、夏半年增温约0.2~2.4℃和0.2~2.6℃。巴里坤隆起区在不同时段同海拔气温均高于其他两个隆起区,夏半年最为明显,这源于依连哈比尔尕山高寒区分布的冰川、积雪反照率产生重要的负反馈作用会造成山地增温效应的降低^[41]。

研究区同海拔气温在太阳辐射纬向递变影响下空间分异显著,各剖面线隆起区的内部较外部增温更加明显。位于81°E(图4e、4f)剖面线的哈尔克他乌山隆起区冬、夏半年同海拔气温由南部外缘的-8.4℃、8.1℃到内部升高至-6.9℃和11.2℃左右,到北部外缘又下降至-9.9℃和8.8℃,地形隆升使得增温约1.4~5℃。位于84.50°E(图4g、4h)剖面线南部的额尔宾隆起区冬、夏半年同海拔气温均值为-5.7℃和13.1℃,中部巴音布鲁克盆地温度小幅降低,至北部依连哈比尔尕山隆起区又上升至-6℃和12℃,到最北部山体外缘温度下降至-12℃和8℃左右,该剖面线内外增温幅度约为1.6~6.3℃。额尔宾隆起区增温更为显著,是由于其纬度更低且南邻夏季温度更高的戈壁荒漠区共同所致,这也表明山体效应空间分异具有一定的复杂性,除受隆起程度影响外还受周边区域下垫面、局地气候环境等综合控制。

研究区山体效应整体分布呈东高西低、南高北低的格局特征,各隆起山地呈现出明显的由山体外部向内部升温的趋势,但隆起区的增温效应强弱有别,这可能与山体的规模、结构、隆起程度、地理位置和下垫面等因素有关。

4.3 中国天山山体效应空间分异归因

4.3.1 山区整体山体效应空间格局归因 前文研究发现中国天山冬、夏半年的山体效应在山系和隆起区尺度上均存在明显差异性。为此本文筛选了与山体效应分布相关的可能影响因子,借助地理探测器依据 q 值评估各因子对山体效应分布格局的贡献程度,并探究各因子对山体效应的交互作用机制。所选取的8个因子(表2)均通过置信度检验,可认为它们均与天山山体效应的分布格局存在显著关系。

因子探测结果表明,不同时段各驱动因子对山体效应的影响强度存在差异,整体贡献度排序为:地形及区位因子>气候因子>下垫面属性。冬、夏半年地形因子解释力分别高达57%和77%,其中内外程度对山体效应空间分异具有明显的主导作用,尤其在夏半年单因子解释力高达17.40%。绝对高程可以直接表征山体的隆起规模和程度,对冬、夏半年山体效应异质性的解释力分别为11.21%和10.5%。此外,地形粗糙度和地形位指数

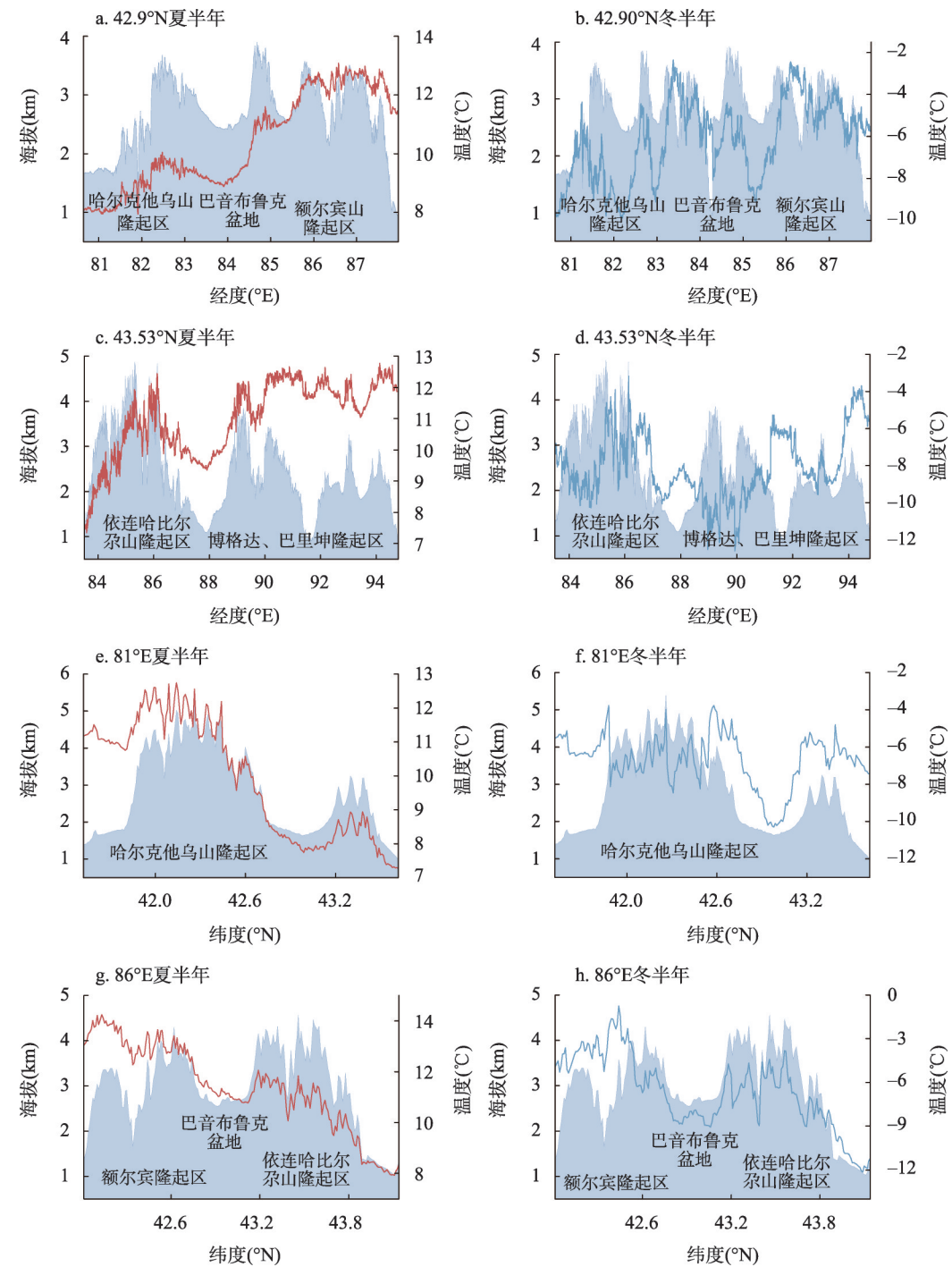


图4 中国天山同海拔气温剖面图

Fig. 4 The same altitude temperature profile in the Tianshan Mountains of China

可共同表征山体的局部结构特征，二者在冬、夏半年对山体效应分异的综合贡献度分别为13.95%和23.72%，是由于地表起伏度越大、越粗糙且切割深度越大，地表热量就越难以与自由大气进行交换，进而影响到山体效应的大小。坡度、坡向是描述微地形尺度的

核心因子, 对同海拔气温冬、夏半年的综合贡献度分别为 18.07%和 25.5%, 其在局部尺度上通过控制太阳辐射量以及与盛行风向的夹角影响山体的增温幅度^[42], 并且纬度越高局地地形因子对太阳辐射影响越大^[43]。降水量是冬半年山体效应空间分异的第一影响因子, 冬、夏半年的解释力分别 24%和 12%。NDVI 可用来表达山区下垫面属性的空间异质性, 探测发现其在冬、夏半年的山体效应贡献度分别达 19.16%和 10.65%, 植被格局与气候变化是长期互相影响和适应的结果, 下垫面属性的季节转变会造成粗糙度、云量与风速的变化, 进一步影响近地表太阳辐射量、潜热及湍流输送等过程, 使得区域气温分布具有明显季节性和空间性差异^[44-46], 进而与其他因子共同造就了中国天山山体效应的空间格局的复杂性。

山体效应相关研究均强调隆起地块对增温效应的基础性作用^[47], 同时也需关注地形、气候环境和下垫面等各类因子如何共同控制山体效应的分布格局。交互探测的结果表明 (图 5), 多种驱动因子组合交互的解释能力强于单因子, 且因子间通过双因子非线性方式可增强山体效应的空间异质性。两时段内地形与气候的交互均对山体效应空间分异的解释能力最强, 其中绝对高程 \cap 降水的交互作用对山体效应的空间分布解释力最典型, 在冬、夏半年的贡献率分布为 0.33 和 0.44, 说明在同一高程带内降水量的空间差异会显著增强山体效应的空间异质性, 绝对高程与内外程度、降水、NDVI 之间的交互作用次之。值得注意的是, 绝对高程在单因子探测中影响力不大, 但与降水、NDVI 的交互作用突出, 是由于绝对高程与二者协调和叠加共同形成独特的山地环流系统和气候特征, 有助于解释山体效应局部的时空异质性和复杂性, 也进一步证实了山地隆起程度对山体增温效应的决定性作用。

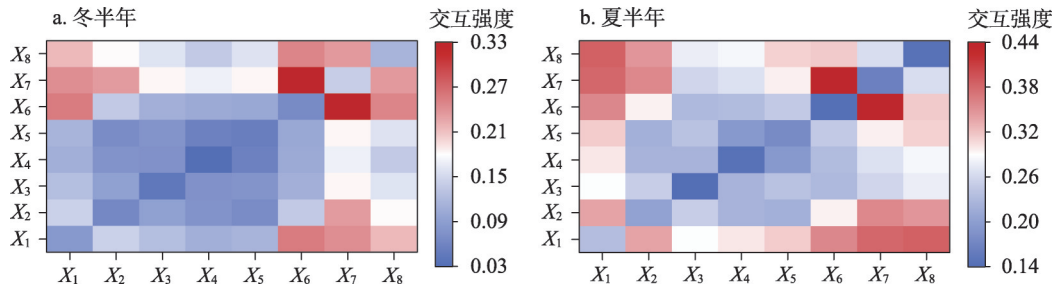


图5 中国天山同海拔气温空间分异驱动因子交互探测结果
Fig. 5 Interactive detection results of spatial differentiation drivers of temperature at the same altitude in the Tianshan Mountains of China

总体来看, 不同时段单因子及因子间的贡献度和主导类型存在差异。单因子探测结果表明地形及区位因子对山体效应时空分异影响最大, 内外程度和高程的主导作用强烈。而地形—气候的因子间交互作用更明显, 绝对高程与内外程度、降水、NDVI 的交互作用对山体效应时空分异作用尤为突出。

4.3.2 各隆起区山体效应空间异质性归因 依据地理探测器探测结果, 选择对研究区山体效应空间异质性解释力较大的内外程度、绝对高程、降水、NDVI 等驱动因子, 引入 GWR 模型识别主要驱动因子在作用方向和强度的空间差异。

GWR 相关系数表明各驱动因子均具有空间非平稳性, 且变异程度及特征不一 (表 4)。绝对高程 (图 6b) 对山体效应的影响具有显著的空间非平稳性 (冬: $-12.11\sim 45.17$, 夏: $-21.75\sim 29.81$), 整体主要以正向影响为主。绝对高程有效促进了隆起区增

表 4 中国天山各隆起区主要驱动因子作用统计

时段 驱动因子	夏半年				冬半年			
	内外程度	绝对高程	降水	NDVI	内外程度	绝对高程	降水	NDVI
中国天山	3.82	11.90	-7.73	-0.47	-2.99	6.39	-11.26	-0.72
天山南脉隆起区	15.01	-11.56	13.76	-0.79	0.21	2.71	0.38	-0.35
哈尔克他乌山隆起区	0.93	10.34	-8.21	-2.25	-2.93	3.02	-6.61	-0.59
额尔宾隆起区	-1.21	26.16	-17.58	-0.48	-5.15	11.90	-11.63	0.12
博依阿隆起区	-0.25	21.76	-13.59	0.43	-2.60	12.22	-15.22	1.21
博格达隆起区	1.46	23.34	-17.45	-0.06	-3.59	5.19	-22.15	-2.50
巴里坤隆起区	2.99	22.72	-21.31	-0.15	-4.22	5.93	-25.28	-3.74

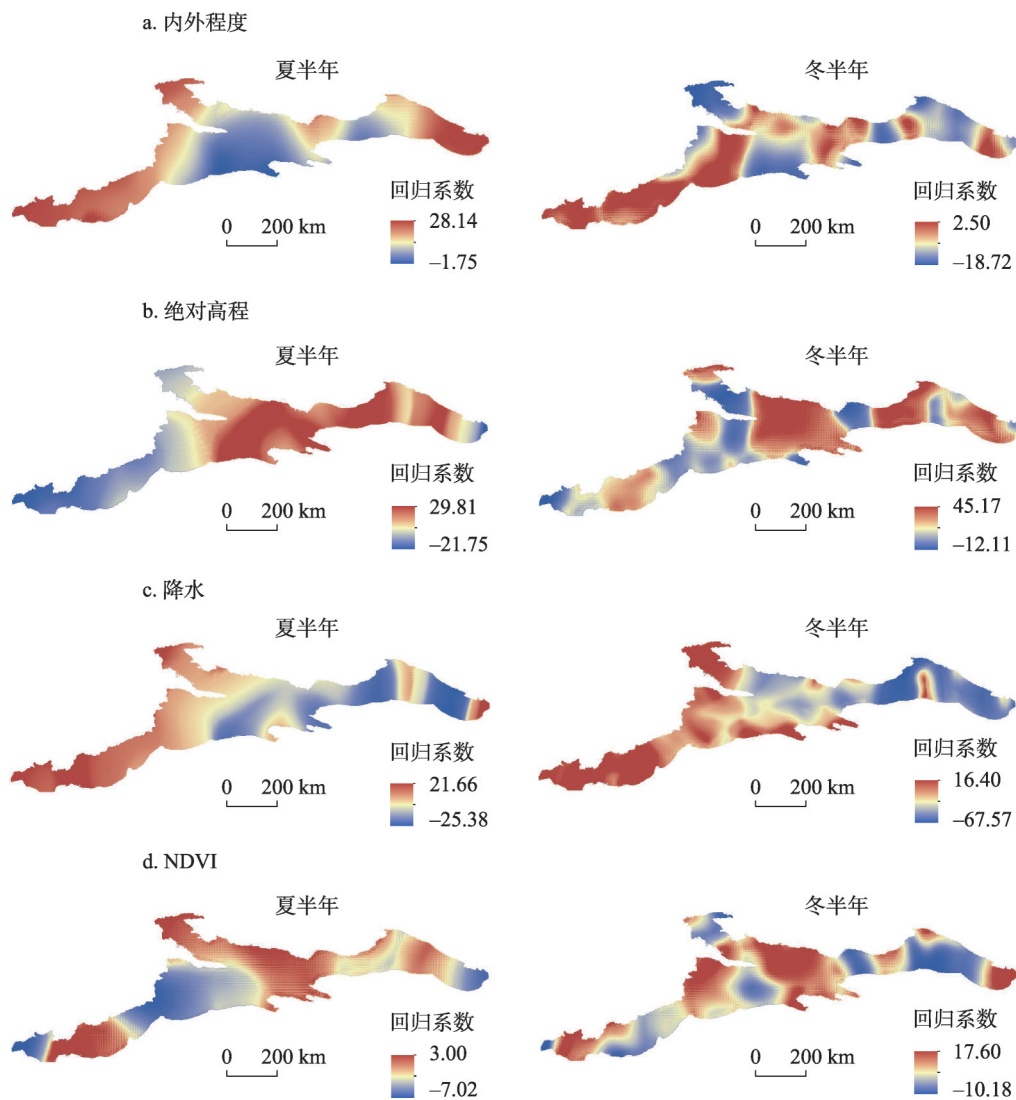


图 6 中国天山同海拔气温格局受主要驱动因子作用空间分异

Fig. 6 The spatial differentiation of temperature pattern affected by the main driving factors at the same altitude in the Tianshan Mountains of China

温, 其中博依阿隆起区和额尔宾隆起区的山体效应受绝对高程的正反馈作用最强烈。降水(图6c)与NDVI(图6d)对冬、夏半年山体效应的影响以负反馈作用为主, 降水(-11.26)的负反馈作用较NDVI(-0.96)更为突出。一般而言, 降水量越稀少山体效应越强烈, 并且由地形诱发积云所产生降水释放的凝结潜热也是影响隆起区加热效应的原因之一。研究区中部及东部降水的稀少对隆起区增温起到积极作用, 巴里坤隆起区负反馈作用最为强烈, 西部山体效应微弱与该地区气候湿润有关。整体来看, NDVI表现为微弱的负反馈作用, 与NDVI越低山体增温越显著的结论一致。哈尔克他乌山隆起区夏半年NDVI对山体效应的负反馈作用最显著, 冬半年博格达及巴里坤隆起区NDVI的控制作用最强。内外程度对山体效应的影响来看(图6a), 夏半年以正向为主, 冬半年以负向为主。天山南脉隆起区山体效应受内外程度影响最明显, 山体内部因湿润气流无法到达变得干燥, 同时纬度低所获得较多的太阳辐射量造成山体效应强烈。总体而言, 中部及东部隆起区绝对高程相对较高、降水稀少、植被覆盖低有利于山体增温, 南部隆起区增温与内外程度关系更为密切。

5 讨论

5.1 中国天山与其他山地山体效应特征比较

全球诸多山体的规模/结构、地理位置、基面高度等因素造成山体内部热力效应强弱有别, 为增进对山体效应系统性和完整性的认识, 收集了全球代表性山地现有研究成果, 与本文得出的中国天山山体效应特征进行对比分析。

目前已有典型山地的山体效应特征对比来看, 世界“第三极”——青藏高原山体效应最为强烈, 其内外温差最高可达 $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ ^[35]; 秦岭^[11]、安第斯山脉^[17]、阿尔卑斯山^[9]与落基山脉^[8]增幅次之, 天山隆起区冬半年最大增幅约为 $7\text{ }^{\circ}\text{C}$, 夏半年约为 $5\text{ }^{\circ}\text{C}$, 中国天山的山体效应相对较弱。天山的宽度和平均海拔等大于阿尔卑斯山等山地, 造成其山体效应较小的原因为: 一方面, 山体效应的剧烈程度与山体基面高度的分布高度一致, 青藏高原基面高度^[48]分布在 $2000\sim 5000\text{ m}$ 的范围内, 山体效应最强烈的西部基面高度更是高达 5000 m ; 秦岭^[49]、安第斯山脉^[9]山体基面高度在 $147\sim 4000\text{ m}$ 内, 阿尔卑斯山^[9]、落基山脉^[8]基面高度从 $6\sim 2342\text{ m}$ 不等, 而天山^[48]山体的基面高度($0\sim 2000\text{ m}$)明显小于其他山脉; 另一方面, 山体所处的海陆位置与结构、走向及盛行风向、微地形等共同影响区域大气环流进而形成局地气候, 以上能量交换过程会影响山体效应的宏观和局部格局。南北走向的安第斯山脉中段玻利维亚高原西部在南部西风带的影响下大陆度较高^[50], 因而其山体效应最显著; 同为南北走向的落基山脉阻挡盛行西风带来的潮湿气流, 错落有致的山脉及巨大沟壑的地形特点和大陆性气候共同导致山体增温^[8]。山体效应的强弱也与降水大陆度有关, 天山作为东西走向且深居内陆的中纬度山地, 山体内分布的大量盆地和谷底气候温和湿润, 天山北坡更是能够获得北冰洋冷湿气流带来较多的降水, 进而导致天山山体效应强弱的南北差异。以上山地都具有明显的山体效应, 并且各自的规模、走向、地理位置及各尺度下的大气环流和地理因素均存在差异。

5.2 山体效应评估因子筛选

山区地—气温转换过程受到多要素的综合影响, 本文仅考虑了气压、风速、湿度等部分气象和地形因子。事实上, 未纳入本文的其他因子也会影响到山区气候特征^[51]。例如, 坡向对山区太阳辐射能的分布具有决定性的作用, 同时对山区热力、风速、降水再分配等产生重大影响^[52]; 地形起伏度和地形遮蔽度对区域温度和太阳辐射分异影响较

大^[53]。从地表辐射收支与能量平衡角度来看,地表反照率是关键要素,而下垫面、降水、冰川积雪等的变化将影响地表通量进而改变区域气候^[54-55]。太阳辐射作为地球表面能量的主要能源,复杂地形下太阳辐射亦具有时空异质性^[56]。在复杂地形区,地形阴影是直接和间接影响太阳辐射的重要因素^[57],同时多云天气具有显著的各向异性辐射^[58],从能量平衡的视角综合考虑地形、环境要素及其对山区辐射增温的耦合效应,或将对山体效应形成有更为直接的认知。由此来看,本文在探究山体效应空间分异时的因子选取中存在主观和客观局限性。除因子选择外,还需纳入不同因子对地气温转化的作用尺度差异以提高气温反演精度。本文在反演气温的基础上对中国天山山体效应进行评估,并探测影响山体效应的主要驱动因子并模拟其作用的空间非平稳性,厘清了不同隆起区增温主导因子的作用机制。不仅提供一个维度来定量确定驱动山体效应产生空间异质性的因子,还探讨了其与山体效应强弱的空间关系。但山体效应主要驱动因子在不同尺度上存在差异,空间尺度变化可能改变山体增温幅度与驱动因子之间的关联性和强度,加之部分因子数据难以获取和量化。因此,未来研究需要将多时空尺度和多源数据相结合,通过跨尺度对山体效应的空间分异规律开展全面的探究。

6 结论

本文基于多源遥感数据和实测气象数据构建山区气温反演模型,分析中国天山山体效应的时空分异特征,并采用地理探测器及GWR模型揭示不同时空尺度山体效应空间分异的驱动机制,主要得到以下结论:

(1) 中国天山气温格局复杂多样,其分布整体呈东西高中部低、边缘高内部低的环状格局。气温与海拔、内外程度均呈负相关,夏半年垂直递减率高达 $0.63\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$,距边界的递减速率高达 $1.39\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ km}$,冬半年因广泛而普遍的逆温现象导致垂直递减率仅为 $0.55\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$,气温由外围至内部腹地的降温速度减小至 $1.03\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ km}$ 。

(2) 研究区山体增温效应普遍且显著,隆起区的增温效应强于天山整体均值,其中天山南脉、额尔宾隆起区与巴里坤隆起区的增温效应最为突出。连续大型沟谷和山间盆地等地貌单元的干预既减慢部分隆起区纬向递减速率,也削弱山地气温的海拔依赖性。自西向东,冬、夏半年同海拔气温由外部至内部增幅分别为 $0.2\sim 3.9\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $0.2\sim 3.3\text{ }^{\circ}\text{C}$;由北至南冬、夏半年内外增温约 $1.4\sim 6.3\text{ }^{\circ}\text{C}$,增温效应由山体边缘向内部明显增强。

(3) 中国天山山体效应时空分异受地形及区位因子主导,其中内外程度和海拔是影响山体效应分异的关键因子。因子间的交互作用对山体效应空间分异的影响大于单一因子,地形与气候是主要交互类型,绝对高程和降水是增强冬、夏半年山体效应空间异质性的主导组合类型。

(4) 驱动因子对中国天山山体效应空间变化的作用方向和强度存在明显的空间异质性。绝对高程与山体效应变化呈显著正相关,降水和NDVI则以负反馈作用为主。地形对山体效应的宏观控制作用更大,其与降水、下垫面等因子耦合共同形成独特的山地环流系统和气候特征,进而增强研究区山体效应的时空异质性。

参考文献(References)

- [1] Hinojosa L, Napoléone C, Moulery M, et al. The "mountain effect" in the abandonment of grasslands: Insights from the French Southern Alps. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2016, 221: 115-124.
- [2] Zhang Baiping, Yao Yonghui. *Studies on Mass Elevation Effect*. Beijing: China Environmental Science Press, 2015. [张百平, 姚永慧. 山体效应研究. 北京: 中国环境出版社, 2015.]

- [3] Fang Jingyun, Shen Zehao, Cui Haiting. Ecological characteristics of mountains and research issues of mountain ecology. *Biodiversity Science*, 2004, 12(1): 10-19. [方精云, 沈泽昊, 崔海亭. 试论山地的生态特征及山地生态学的研究内容. *生物多样性*, 2004, 12(1): 10-19.]
- [4] Grubb P J, Whitmore T C. A comparison of montane and lowland rain forest in Ecuador: II. The climate and its effects on the distribution and physiognomy of the forests. *The Journal of Ecology*, 1966, 54(2): 303. DOI: 10.2307/2257951.
- [5] Leahey R J G, Proctor J. Invertebrates in the litter and soil at a range of altitudes on Gunung Silam, a small ultrabasic mountain in Sabah. *Journal of Tropical Ecology*, 1987, 3(2): 119-129.
- [6] Zhang B P, Yao Y H. Implications of mass elevation effect for the altitudinal patterns of global ecology. *Journal of Geographical Sciences*, 2016, 26(7): 871-877.
- [7] Zhao Fang. A quantitative study of the mass mountain effect based on the theoretical and real distribution of mountain altitudinal belts [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2015. [赵芳. 基于理想状态山地垂直带界限分布的山体效应定量化研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2015.]
- [8] Wang Jing, Zhang Baiping, Zhang Wenjie, et al. Quantitative research of mass elevation effect in Colorado Rocky Mountains. *Geographical Research*, 2017, 36(8): 1467-1477. [王婧, 张百平, 张文杰, 等. 科罗拉多落基山脉山体效应定量化研究. *地理研究*, 2017, 36(8): 1467-1477.]
- [9] Zhang Shuo. Quantitative study of mass elevation effect based on its main forming-factors [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2015. [张朔. 山体效应主要形成因素及其定量化研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2015.]
- [10] Han Fang, Zhang Baiping, Tan Jing, et al. The effect of mountain base elevation on the altitude of timberline in the southeastern Eurasia: A study on the quantification of mass elevation effect. *Acta Geographica Sinica*, 2010, 65(7): 781-788. [韩芳, 张百平, 谭靖, 等. 山体基面高度对欧亚大陆东南部林线分布的影响: 山体效应定量化研究. *地理学报*, 2010, 65(7): 781-788.]
- [11] Liu Junjie, Pan Ziwu, Qin Fen, et al. Estimation of air temperature based on MODIS and analysis of mass elevation effect in the Qinling-Daba Mountains. *Geographical Research*, 2020, 39(3): 735-748. [刘俊杰, 潘自武, 秦奋, 等. 基于MODIS的秦巴山地气温估算与山体效应分析. *地理研究*, 2020, 39(3): 735-748.]
- [12] Zhang S, Zhang B P, Yao Y H, et al. Magnitude and forming factors of mass elevation effect on Qinghai-Tibet Plateau. *Chinese Geographical Science*, 2016, 26: 745-754.
- [13] Li Wuyang, Lan Xincan, Tang Jiale, et al. Influence of albedo and evapotranspiration on the mass elevation effect in the Qinling-Daba Mountains of China. *Mountain Research*, 2022, 40(4): 614-625. [李午阳, 兰鑫灿, 唐家乐, 等. 地表反照率和蒸散发对秦巴山地增温效应的影响. *山地学报*, 2022, 40(4): 614-625.]
- [14] Navarro G, Molina J A, De la Barra N. Classification of the high-Andean Polylepis forests in Bolivia. *Plant Ecology*, 2005, 176(1): 113-130.
- [15] Wang Y X, Ding K, Li M B, et al. Spatial distribution modeling of temperature increase for the uplifted mountain terrains and its characteristics in Southwest China. *Journal of Mountain Science*, 2017, 14(11): 2270-2283.
- [16] Barry R G. *Mountain Weather and Climate*. New York: Cambridge University Press, 2008.
- [17] He Wenhui. Mass elevation effect simulation based on mountain belts in the Tibetan Plateau and the central Andes [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2016. [贺文慧. 基于垂直带的山体效应数字模拟: 以青藏高原、安第斯山区中段为例[D]. 北京: 中国科学院大学, 2016.]
- [18] Kattel D B, Yao T, Yang K, et al. Temperature lapse rate in complex mountain terrain on the southern slope of the central Himalayas. *Theoretical and Applied Climatology*, 2013, 113: 671-682.
- [19] Shao J A, Li Y B, Ni J P. The characteristics of temperature variability with terrain, latitude and longitude in Sichuan-Chongqing Region. *Journal of Geographical Sciences*, 2012, 22(2): 223-244.
- [20] Zhou Guangsheng, Wang Yuhui. The feedback of land use/cover change on climate. *Journal of Natural Resources*, 1999, 14(4): 318-322. [周广胜, 王玉辉. 土地利用/覆盖变化对气候的反馈作用. *自然资源学报*, 1999, 14(4): 318-322.]
- [21] Wang Jinfeng, Xu Chengdong. *Geodetector: Principle and prospective*. *Acta Geographica Sinica*, 2017, 72(1): 116-134. [王劲峰, 徐成东. *地理探测器: 原理与展望*. *地理学报*, 2017, 72(1): 116-134.]
- [22] Gao Jiangbo, Jiao Kewei, Wu Shaohong. Revealing the climatic impacts on spatial heterogeneity of NDVI in China during 1982-2013. *Acta Geographica Sinica*, 2019, 74(3): 534-543. [高江波, 焦珂伟, 吴绍洪. 1982—2013年中国植被NDVI空间异质性的气候影响分析. *地理学报*, 2019, 74(3): 534-543.]
- [23] Brunson C, Fotheringham A S, Charlton M E. Geographically weighted regression: A method for exploring spatial

- nonstationarity. *Geographical Analysis*, 1996, 28(4): 281-298.
- [24] Zhao Mingsong, Liu Binyin, Lu Hongliang, et al. Spatial modeling of soil organic matter over low relief areas based on geographically weighted regression. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2019, 35(20): 102-110. [赵明松, 刘斌寅, 卢宏亮, 等. 基于地理加权回归的地形平缓区土壤有机质空间建模. *农业工程学报*, 2019, 35(20): 102-110.]
- [25] Zhao Gang. The study of glacier changes in typical regions, China Tianshan Mountains [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2014. [赵刚. 中国天山典型地区冰川变化研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2014.]
- [26] Hu Ruji. *Physical Geography of the Tianshan Mountains in China*. Beijing: China Environmental Science Press, 2004. [胡汝骥. 中国天山自然地理. 北京: 中国环境科学出版社, 2004.]
- [27] Qin Yan, Ding Jianli, Zhao Qiudong, et al. Spatial-temporal variation of snow cover in the Tianshan Mountains from 2001 to 2015, and its relation to temperature and precipitation. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2018, 40(2): 249-260. [秦艳, 丁建丽, 赵求东, 等. 2001—2015年天山山区积雪时空变化及其与温度和降水的关系. *冰川冻土*, 2018, 40(2): 249-260.]
- [28] Zhou Xia, Chen Dongjing. Study on vertical change features of climate in the southern of Tianshan Mountains. *Mountain Research*, 1998, 16(1): 47-52. [周霞, 陈东景. 天山南坡气候垂直变化特征. *山地研究*, 1998, 16(1): 47-52.]
- [29] Zhang Baiping, Tan Ya, Mo Shenguo. Digital spectrum and analysis of altitudinal belts in the Tianshan Mountains. *Mountain Research*, 2004, 22(2): 184-192. [张百平, 谭妮, 莫申国. 天山数字垂直带谱体系与研究. *山地学报*, 2004, 22(2): 184-192.]
- [30] Wu Aibin, Qin Yanjie, Zhao Yanxia. Terrain composite index and its application in terrain gradient effect analysis of land use change: A case study of Taihang hilly areas. *Geography and Geo-Information Science*, 2018, 34(6): 93-99, 118. [武爱彬, 秦彦杰, 赵艳霞. 地形综合指数及其在土地利用地形梯度效应分析中的应用: 以太行山浅山丘陵区为例. *地理与地理信息科学*, 2018, 34(6): 93-99, 118.]
- [31] Williamson S N, Hik D S, Gamon J A, et al. Evaluating cloud contamination in clear-sky MODIS terra daytime land surface temperatures using ground-based meteorology station observations. *Journal of Climate*, 2013, 26(5): 1551-1560.
- [32] Prihodko L, Goward S N. Estimation of air temperature from remotely sensed surface observations. *Remote Sensing of Environment*, 1997, 60(3): 335-346.
- [33] Zhao Guining, Zhang Zhengyong, Liu Lin, et al. Changes of glacier mass balance in Manas river basin based on multi-source remote sensing data. *Acta Geographica Sinica*, 2020, 75(1): 98-112. [赵贵宁, 张正勇, 刘琳, 等. 基于多源遥感数据的玛纳斯河流域冰川物质平衡变化. *地理学报*, 2020, 75(1): 98-112.]
- [34] Yu Haozhe, Li Lijuan, Li Jiuyi. Establishment of comprehensive drought monitoring model based on downscaling TRMM and MODIS data. *Journal of Natural Resources*, 2020, 35(10): 2553-2568. [余灏哲, 李丽娟, 李九一. 基于TRMM降尺度和MODIS数据的综合干旱监测模型构建. *自然资源学报*, 2020, 35(10): 2553-2568.]
- [35] Yao Yonghui, Zhang Baiping. MODIS-based estimation of air temperature and heating-up effect of the Tibetan Plateau. *Acta Geographica Sinica*, 2013, 68(1): 95-107. [姚永慧, 张百平. 基于MODIS数据的青藏高原气温与增温效应估算. *地理学报*, 2013, 68(1): 95-107.]
- [36] Jobbágy E G, Jackson R B. Global controls of forest line elevation in the northern and southern hemispheres. *Global Ecology and Biogeography*, 2000, 9(3): 253-268.
- [37] Wu Chengyong, Cao Guangchao, Chen Kelong, et al. Spatio-temporal variation in soil conservation service and its influencing factors in the upper reaches of the Yellow River. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2022, 36(4): 143-150. [吴成永, 曹广超, 陈克龙, 等. 黄河上游地区水土保持服务时空变化及归因. *水土保持学报*, 2022, 36(4): 143-150.]
- [38] Han Jing, Rui Yang, Yang Kun, et al. Quantitative attribution of national key town layout based on geodetector and the geographically weighted regression model. *Progress in Geography*, 2020, 39(10): 1687-1697. [韩静, 芮阳, 杨坤, 等. 基于地理探测器和GWR模型的中国重点镇布局定量归因. *地理科学进展*, 2020, 39(10): 1687-1697.]
- [39] Zhang Zhengyong. Modeling hydrological processes in main runoff generating area of Manasi river basin, Xinjiang [D]. Shihezi: Shihezi University, 2018. [张正勇. 玛纳斯河流域产流区水文过程模拟研究[D]. 石河子: 石河子大学, 2018.]
- [40] Shen Yongping, Su Hongchao, Wang Guoya, et al. The responses of glaciers and snow cover to climate change in Xinjiang (I): Hydrological effect. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2013, 35(3): 513-527. [沈永平, 苏宏超, 王国亚, 等. 新疆冰川、积雪对气候变化的响应(I): 水文效应. *冰川冻土*, 2013, 35(3): 513-527.]
- [41] Zhang H B, Immerzeel W W, Zhang F, et al. Snow cover persistence reverses the altitudinal patterns of warming above

- and below 5000 m on the Tibetan Plateau. *Science of the Total Environment*, 2022, 803: 149889. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.149889.
- [42] Yeh T C. Some aspects of the thermal influences of the Qinghai-Tibetan Plateau on the atmospheric circulation. *Archives for Meteorology, Geophysics, and Bioclimatology, Series A*, 1982, 31(3): 205-220.
- [43] Zeng Yan, Qiu Xinfu, Liu Changming, et al. Distributed modelling of direct solar radiation of rugged terrain over the Yellow River Basin. *Acta Geographica Sinica*, 2005, 60(4): 680-688. [曾燕, 邱新法, 刘昌明, 等. 起伏地形下黄河流域太阳直接辐射分布式模拟. *地理学报*, 2005, 60(4): 680-688.]
- [44] Wu Pengfei, Zhang Junyong, Tan Jiao. Temporal and spatial variation of sunshine duration and related driving forces in Tianshan Mountain during 1961-2015. *Meteorological Science and Technology*, 2019, 47(3): 450-459. [武鹏飞, 张钧泳, 谭娇. 1961—2015年新疆天山日照时数时空变化特征及其影响因素分析. *气象科技*, 2019, 47(3): 450-459.]
- [45] Chen Ditao, Huang Farong, Li Qian, et al. Spatial variation of humidity and its influencing factors in the north and south slopes of the Tianshan Mountains, China during 1966-2015. *Climate Change Research*, 2018, 14(6): 562-572. [陈迪桃, 黄法融, 李倩, 等. 1966—2015年天山南北坡空气湿度差异及其影响因素. *气候变化研究进展*, 2018, 14(6): 562-572.]
- [46] Molnar P, Emanuel K A. Temperature profiles in radiative-convective equilibrium above surfaces at different heights. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 1999, 104(D20): 24265-24271.
- [47] Kitoh A. Mountain uplift and surface temperature changes. *Geophysical Research Letters*, 1997, 24(2): 185-188.
- [48] Han Fang, Zhang Baiping, Tan Jing, et al. The effect of mountain basal elevation on the distribution of snowline with different mountain basal elevations in Tibetan Plateau and its surrounding areas. *Geographical Research*, 2014, 33(1): 23-30. [韩芳, 张百平, 谭婧, 等. 山体基面高度对青藏高原及其周边地区雪线空间分布的影响. *地理研究*, 2014, 33(1): 23-30.]
- [49] Liu Junjie, Qin Fen, Zhao Fang, et al. Extraction and distribution of mountain base elevation in the Qinling-Daba Mountains. *Journal of Geo-information Science*, 2018, 20(10): 1457-1466. [刘俊杰, 秦奋, 赵芳, 等. 秦巴山地山体基面高度的提取及分布. *地球信息科学学报*, 2018, 20(10): 1457-1466.]
- [50] Arias P A, Garreaud R, Poveda G, et al. Hydroclimate of the Andes (Part II): Hydroclimate variability and sub-continental patterns. *Frontiers in Earth Science*, 2021, 8. DOI: 10.3389/feart.2020.505467.
- [51] Zhang Liwen, Huang Jingfeng, Wang Xiuzhen. A review on air temperature estimation by satellite thermal infrared remote sensing. *Journal of Natural Resources*, 2014, 29(3): 540-552. [张丽文, 黄敬峰, 王秀珍. 气温遥感估算方法研究综述. *自然资源学报*, 2014, 29(3): 540-552.]
- [52] Wei Shenglong, Chen Zhibiao, Chen Zhiqiang, et al. Simulation of the total solar radiation over micro-landform and correlation between the solar radiation and the land surface temperature. *Remote Sensing for Land & Resources*, 2017, 29(1): 129-135. [魏胜龙, 陈志彪, 陈志强, 等. 微地形上太阳辐射模拟及与地表温度关系研究. *国土资源遥感*, 2017, 29(1): 129-135.]
- [53] Weng Duming, Luo Zhexion. *Topographical Climate in Mountainous Areas*. Beijing: China Meteorological Press, 1990. [翁笃鸣, 罗哲贤. *山区地形气候*. 北京: 气象出版社, 1990.]
- [54] Lu Yunbo, Wang Lunche, Niu Zigeng, et al. Variations of land surface albedo and its influencing factors in China from 2000 to 2017. *Geographical Research*, 2022, 41(2): 562-579. [陆云波, 王伦澈, 牛自耕, 等. 2000—2017年中国区域地表反照率变化及其影响因子. *地理研究*, 2022, 41(2): 562-579.]
- [55] Tian Y Q, Davies-Colley R J, Gong P, et al. Estimating solar radiation on slopes of arbitrary aspect. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2001, 109(1): 67-74.
- [56] Chen M, Zhuang Q L, He Y J. An efficient method of estimating downward solar radiation based on the MODIS observations for the use of land surface modeling. *Remote Sensing*, 2014, 6(8): 7136-7157.
- [57] Zhang S H, Li X G, She J F, et al. Assimilating remote sensing data into GIS-based all sky solar radiation modeling for mountain terrain. *Remote Sensing of Environment*, 2019, 231: 111239. DOI: 10.1016/j.rse.2019.111239.
- [58] Zhang Y L, Li X, Bai Y L. An integrated approach to estimate shortwave solar radiation on clear-sky days in rugged terrain using MODIS atmospheric products. *Solar Energy*, 2015, 113: 347-357.

Spatio-temporal pattern and attribution analysis of mass elevation effect in Tianshan Mountains of China

ZHANG Mingyu^{1,2}, ZHANG Zhengyong^{1,2}, LIU Lin^{1,2}, ZHANG Xueying^{1,2}, KANG Ziwei³,
CHEN Hongjin^{1,2}, GAO Yu^{1,2}, WANG Tongxia⁴, YU Fengchen^{1,2}

(1. School of Science, Shihezi University, Shihezi 832000, Xinjiang, China; 2. Key Laboratory of Oasis Town
and Mountain-basin System Ecology of Xinjiang Bingtuan, Shihezi 832003, Xinjiang, China, 3. Xinjiang
Institute of Ecology and Geography, CAS, Urumqi 830011, China, 4. School of Water Conservancy &
Architectural Engineering, Shihezi University, Shihezi 832000, Xinjiang, China)

Abstract: The mass mountain effect (MEE) is a thermal effect generated by the uplifted mountain, which has a universal and profound impact on the pattern of hydrothermal conditions and ecological geographical processes in mountainous areas. It is also one of the breakthroughs in mountain science research. Based on multi-source remote sensing data and observation data, we carried out the spatial downscaling inversion of temperature in the Tianshan Mountains of China, and explored the MEE estimation and spatio-temporal pattern analysis in the study area. The GeoDetector and GWR models are used to explore the temporal and spatial heterogeneity of the region. The results show that: (1) The temperature pattern of the study area is complex and diverse, and the overall distribution characteristics are high in the south and low in the north, and high in the east and low in the west. The zonal characteristics of temperature were obvious, and the temperature was negatively correlated with altitude, interior and exterior degree. (2) The warming effect of mountains was common and prominent, and the temperature at the same altitude increased in steps from west to east and from north to south. Geomorphological units such as large valleys and intermountain basins weaken the latitudinal zonality and altitude dependence of temperature at the same altitude, among which the warming effect of mountains was observed in the southern Tianshan Mountains, especially in Erbin and Balikun. (3) The dominant factors affecting the overall pattern of the MEE in the study area were topography and location, among which the internal and external degrees and elevation played a prominent role. The interaction between factors has a greater influence on the spatial differentiation of mountain effects than that of single factors, and the interaction between terrain and climate, precipitation, NDVI and other factors is strong. (4) There was obvious spatial heterogeneity in the direction and intensity of the spatial variation of the MEE. Absolute elevation was significantly positively correlated with the change of mountain effect, while precipitation and NDVI were dominated by negative feedback. In general, topography has a greater effect on the macroscopic control of MEE, coupling with precipitation, underlying surface and other factors to form a unique mountain circulation system and climate characteristics, which in turn enhances the temporal and spatial heterogeneity of the MEE in the Tianshan Mountains. The results are a useful supplement to the analysis of the causes of MEE and their ecological effects.

Keywords: mass elevation effect; spatial downscaling; Geodetector; GWR; Chinese Tianshan Mountains