

李晓燕,曹广超,陈宗颜,等.2001—2022年祁连山南坡地表温度时空变化特征及驱动因素[J].中国沙漠,2024,44(5):84–94.

# 2001—2022年祁连山南坡地表温度时空变化特征及驱动因素

李晓燕<sup>1</sup>,曹广超<sup>1,2</sup>,陈宗颜<sup>1,2</sup>,袁杰<sup>1,2</sup>,孙子婷<sup>1</sup>,唐建亭<sup>1</sup>

(1.青海师范大学 青藏高原地表过程与生态保育教育部重点实验室/地理科学学院/青海省自然地理与环境过程重点实验室,青海 西宁 810008; 2.青海省人民政府-北京师范大学高原科学与可持续发展研究院,青海 西宁 810008)

**摘要:** 基于MOD11A2、数字高程模型(DEM)、土地利用类型、气象(降水量、气温)及归一化植被指数等数据,利用趋势分析、线性回归、地理探测器等方法,对2001—2022年祁连山南坡地表温度(Land Surface Temperature, LST)进行分析,探讨了影响LST变化的驱动因素。结果表明:(1)在时间维度上,2001—2022年祁连山南坡LST总体呈上升趋势,且表现出明显的时段变化,生长季(5—9月)LST增温率高于非生长季。白天LST呈不显著下降趋势( $-0.065\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ ),夜间LST呈显著上升趋势( $0.21\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ ),而年均LST以 $0.072\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ 的速率上升。月平均LST先增大后减小,并以7月为转折点呈对称分布。(2)在空间维度上,LST高值区主要分布在河谷区域。平均LST随海拔升高递减率为 $0.59\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$ 。不同覆盖类型LST排序为:裸地<水域<草地<林地<建设用地<耕地。(3)在单一因子影响下,海拔是影响LST变化的主要因素,气温次之。在因子组合控制下,气温∩降水量解释力最大( $q=0.61$ ),表明气温与降水量耦合是该区LST的主要影响因素。

**关键词:** 地表温度; 时空变化; 影响因子; 祁连山南坡

文章编号: 1000-694X(2024)05-084-11

DOI: 10.7522/j.issn.1000-694X.2024.00048

中图分类号: P423

文献标志码: A

## 0 引言

地表温度(Land Surface Temperature, LST)作为地表生态环境系统研究和地球资源变化监测的重要指标,在进行区域土壤水分估算、农业信息检测和下垫面评估等方面具有重要指示作用<sup>[1]</sup>。目前气候变化和生态环境问题已经成为全球关注的焦点,工业化和城市化的快速发展,人类对自然资源的开发利用日益加剧,导致了诸如全球变暖、极端天气频发、生态系统退化等一系列环境问题,不仅影响了人类的生存和发展,也对地球的生态系统造成了严重破坏<sup>[2]</sup>,地表温度定量研究及其空间格局分析在解决这些问题中发挥着重要作用<sup>[3]</sup>。在半干旱地区,地表温度时空格局变化的研究具有特殊的重要性。明确流域地表温度时空格局变化有助于我们更好地了解地表能量平衡状况、水资源分布和生态

环境状况,为合理开发利用流域资源、建设生态农业、维持生态平衡、提高资源利用率以及保障流域生态环境健康提供科学依据<sup>[4]</sup>。

地表温度变化已经成为全球关注的热点问题,不同领域的专家学者对地表温度变化进行深入研究,目前利用MODIS数据产品在青藏高原和东北冻土区等区域进行的地表温度反演研究证明该数据产品不仅能够捕捉到复杂地形区域的温度变化,而且证实该数据产品在复杂地形下对地表能量的刻画具备科学性与可靠性<sup>[5]</sup>。王惠民<sup>[6]</sup>、胡盼盼<sup>[7]</sup>、朱智等<sup>[8]</sup>指出,虽然各大陆板块之间温度变化差异较大,但气候变暖是导致其温度变化的关键性因素。康利刚等<sup>[9]</sup>利用趋势分析以及相关性分析方法探究青海湖流域地表温度的时空变化,指出近20年青海湖流域年均地表温度整体呈上升趋势;邱丽莎等<sup>[10]</sup>认为,地表温度与NDVI呈显著负相关,且生长

收稿日期:2023-12-26; 改回日期:2024-04-02

资助项目:青海省自然科学基金项目(2023-ZJ-907M);青海省“昆仑英才·高端创新创业人才”计划项目(青人才字[2023]01号);青海省“高端创新人才千人计划”(青人才字[2019]06号)

作者简介:李晓燕(1997—),女,甘肃会宁人,硕士研究生,研究方向为地表环境过程。E-mail: 3460150742@qq.com

通信作者:袁杰(E-mail: yuanjie8903@126.com)

季 NDVI 对地表温度调控较显著;周刊社等<sup>[11]</sup>利用 M-K 检验等方法分析地气温差变化趋势,揭示了浅层地温呈显著上升趋势,并指出藏东部地区增温幅度相对较小。纵观已有研究,作为重要水源涵养区的祁连山南坡地表温度研究较少被关注<sup>[12]</sup>,祁连山南坡地区地形地貌的复杂性以及气候类型的多样性会导致地表温度变化具有不同的响应<sup>[13]</sup>。为此,本文基于 MOD11A2 数据产品,提取 2001—2022 年祁连山南坡白天和夜晚地表温度数据,采用地理信息系统和地统计分析方法,对该地区地表温度时空分异规律进行深入研究,以为祁连山南坡地表温度变化及影响因素提供相关研究数据,同时为该区域的农业发展、生态环境保护及草场退化治理提供参考依据。

1 研究区概况

祁连山南坡地处青藏高原东北部,位于西北干旱区、青南高寒区和东部季风区交会地带<sup>[14]</sup>(图 1)。研究区主要包括祁连县、门源回族自治县、刚察县北部、天峻县东北部和海晏县北部,面积约 2.4 万 km<sup>2</sup>。地貌复杂多样,山高、坡陡、谷深,山河相间分布,海拔 2 284~5 210 m,地势西北高东南低。该区河流主要包括黑河、大通河、八宝河和托勒河。受高原气候和大陆性气团控制,冬季漫长且寒冷干燥,夏季短促而温凉湿润,无明显四季交替,5—9 月为生长季。年降水量约 400 mm,集中在 6—8 月。

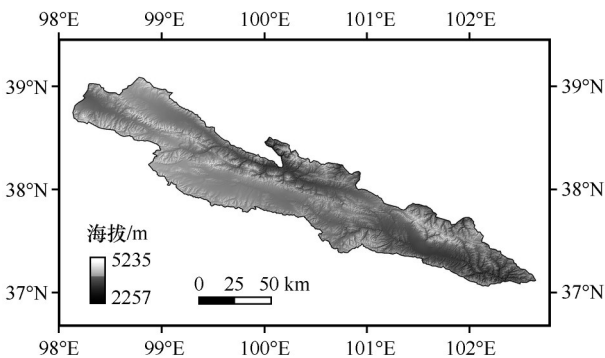


图 1 研究区高程

Fig.1 Elevation of the study area

研究区垂直方向上分布着冰川、森林、灌丛、高寒草甸和湿地等多种生态系统<sup>[15]</sup>。

2 数据与方法

2.1 数据来源

采用美国航天航空局 NASA 网站(<http://modis.gsfc.nasa.gov/>) MODIS 数据产品,根据研究区所在的条带号下载,通过 MRT 软件提取 2001—2022 年白天和夜晚地表温度数据,并进行重投影,最后通过 ArcGIS10.8 裁剪至相应区域。气温、降水量以及 NDVI 来自国家地球系统科学数据中心(<http://www.geodata.cn>);高程数据来自地理空间数据云(<http://www.gscloud.cn>);坡度、坡向通过高程提取;土地利用数据来自 GEE(<https://earthengine.google.com>)。具体信息见表 1。

表 1 数据来源与处理  
Table 1 Data sources and processing

| 数据类型        | 数据来源   | 数据产品       | 分辨率      | 数据处理                                   |
|-------------|--|------------|----------|--|
| 地表温度        | 美国航天航空局 NASA 网站( <a href="http://modis.gsfc.nasa.gov/">http://modis.gsfc.nasa.gov/</a> ) | MOD11A2    | 8 d,1 km | 利用 MRT、ArcGIS10.8 进行拼接、投影转换、重采样和裁剪等预处理 |
| 气温、降水量、NDVI | 国家地球系统科学数据中心( <a href="http://www.geodata.cn">http://www.geodata.cn</a> )                | 中国地面资料年值数据 | 1 km     | 利用 ArcGIS10.8 软件进行裁剪与重分类               |
| DEM、坡度、坡向   | 地理空间数据云( <a href="http://www.gscloud.cn">http://www.gscloud.cn</a> )                     | DEM 数字高程数据 | 90 m     | 利用 ArcGIS10.8 软件进行裁剪与重分类               |
| 土地利用        | GEE( <a href="https://earthengine.google.com">https://earthengine.google.com</a> )       | 青海省土地利用数据  | 30 m     | 利用 ArcGIS10.8 软件进行裁剪与重分类               |

2.2 统计分析方法

2.2.1 地表温度单位转换

将原始数据从热力学温度(K)转为摄氏度(°C)<sup>[16]</sup>:

$$LST=DN\times0.02-273.15 \tag{1}$$

式中:DN 代表影像上的像元值;0.02 为缩放因子;273.15 为偏移量;LST 为转化后的摄氏地表温度(°C)。

2.2.2 地表温度趋势分析

将经过处理的地表温度数据合成年地表温度,

利用 ArcGIS10.8 对 2001—2022 年地表温度进行年际变化趋势分析。采用 *Slope* 趋势分析能够更好地认识地表温度随时间的变化幅度<sup>[17]</sup>:

$$Slope = \frac{n \sum_{i=1}^n i \times LST_i - \sum_{i=1}^n i \sum_{i=1}^n LST_i}{n \times \sum_{i=1}^n i^2 - \left( \sum_{i=1}^n i \right)^2} \quad (2)$$

式中: *Slope* 为年际变化率 ( $^{\circ}\text{C} \cdot \text{a}^{-1}$ ); *n* 为研究时段的年份数目 22; *i* 为时间序列值; *LST<sub>i</sub>* 为第 *i* 年地表温度 ( $^{\circ}\text{C}$ )。 *Slope* > 0, 说明地表温度随年份增加呈上升趋势; *Slope* < 0, 说明地表温度随年份增加呈下降趋势; *Slope* = 0, 说明地表温度无变化。

### 2.2.3 空间自相关分析

空间自相关工具同时根据要素位置和要素值来度量空间自相关, 可以用来解释地理现象的空间依赖性和异质性, 该工具通过计算 Moran's *I* 指数值来对该数据的显著性进行评估。全局 Moran's *I* 通过公式<sup>[18]</sup>计算:

$$I = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n W_{ij} (y_i - \bar{y})(y_j - \bar{y})}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n W_{ij} (y_i - \bar{y})^2} \quad (3)$$

全局 Moran's *I* 指数取值  $[-1, 1]$ , 0 表示样本之间随机独立分布, 无相关性, 正值表示相似样本值趋于集中, 负值表示样本之间的空间分布越分散。局部 Moran's *I* 专注于每个研究单元与其邻近单元之间的空间差异程度和显著性:

$$I = \frac{y_i}{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \sum_{j \neq i} W_{ij} (y_i - \bar{y}) \quad (4)$$

式中: *n* 代表样本 *x* 总数; *y<sub>i</sub>* 为第 *i* 个要素的属性值; *W<sub>ij</sub>* 为第 *i* 和第 *j* 个要素的空间权重矩阵。

### 2.2.4 地理探测器

地理探测器是探测空间分异性以及揭示其背后驱动力的空间分析方法, 能够有效地识别影响地表温度的各种因素, 通过建立回归模型, 可以将地表温度与相关因素之间的关系量化, 影响力大小通过 *q* 值衡量, *q* 取值  $[0, 1]$ <sup>[19]</sup>。本文选取海拔、年降水量、年均 NDVI、坡度、坡向、土地利用类型和年均气温等 7 个因子进行探测。

$$q = 1 - \frac{\sum_{h=1}^L N_h \sigma_h^2}{N \sigma^2} \quad (5)$$

式中: *L* 为因子分层总数; *N<sub>h</sub>* 和 *N* 分别代表第 *h* 层和

全区单元数;  $\sigma_h^2$  和  $\sigma^2$  分别代表第 *h* 层和研究区因变量方差。 *q* 值越大, 则对应的单一因子或因子联合对地表温度的解释力越强。

## 3 结果与分析

### 3.1 地表温度年际时空变化特征

祁连山南坡 2001—2022 年平均地表温度为  $0.51^{\circ}\text{C}$ , 总体增加, 呈不显著上升趋势, 年际平均地表温度线性递增率为  $0.0072^{\circ}\text{C} \cdot \text{a}^{-1}$  (图 2), 比赵美亮等<sup>[20]</sup>的青海省地表温度增率结果 ( $0.8255^{\circ}\text{C} \cdot \text{a}^{-1}$ ) 小。2016 年为全年平均地表温度最高年份, 根据杨涵洧等<sup>[21]</sup>的研究结果, 北半球中高纬度地区的环流背景为这次持续性高温事件的发生创造了有利条件, 全年平均地表温度最低值为 2014 年。白天地表温度为  $8.94 \sim 12.35^{\circ}\text{C}$ , 年际线性降温速率为  $0.0065^{\circ}\text{C} \cdot \text{a}^{-1}$ , 最高值出现在 2013 年, 最低值出现在 2019 年, 这与康利刚等<sup>[9]</sup>关于青海湖流域地表温度变化特征研究结果吻合。夜晚地表温度为  $-10.59 \sim -8.79^{\circ}\text{C}$ , 并随年份增加呈上升趋势, 年际增长速率为  $0.021^{\circ}\text{C} \cdot \text{a}^{-1}$ , 虽然年际增长速率看起来不大, 但长期累积下来可能导致显著的温度变化。研究时期内, 昼夜温差随年份增加呈显著减小趋势, 为  $18.5 \sim 21.78^{\circ}\text{C}$ , 年际线性降温率为  $0.027^{\circ}\text{C} \cdot \text{a}^{-1}$ 。

空间分布上, 祁连山南坡年均白天、年均夜晚、年均地表温度均表现出明显的空间异质性, 整体上沿河谷地表温度高, 河谷两侧地表温度低 (图 3), 原因是河谷地区海拔较低, 地形相对平坦, 风速较小, 有利于热量的积累和传导; 而河谷两侧由于海拔高, 风速大、气温低, 地表覆盖着厚厚的白雪或冰川, 地表反射面会将大部分太阳辐射反射回太空, 导致地表温度降低。年均地表温度高于  $0^{\circ}\text{C}$  的占比为 59.77%, 年均白天地表温度有 98.81% 区域高于  $0^{\circ}\text{C}$ , 而年均夜晚地表温度普遍低于  $0^{\circ}\text{C}$ 。

祁连山南坡地表温度年际变化率呈现出显著的地域性差异, 整体上看, 除了祁连山南坡东南部分地区呈下降趋势, 其他区域均呈上升趋势 (图 3)。白天地表温度上升区域占祁连山南坡总面积的 43.51%, 这些区域主要分布在祁连山南坡北侧, 而下降区域主要分布在祁连山南坡南侧。根据童珊等<sup>[22]</sup>的研究结果, 祁连山南坡南侧的植被覆盖较西北部茂密, 茂密的植被可能会通过蒸腾和呼吸作用消耗更多的热量, 从而降低地表温度。年际夜晚地



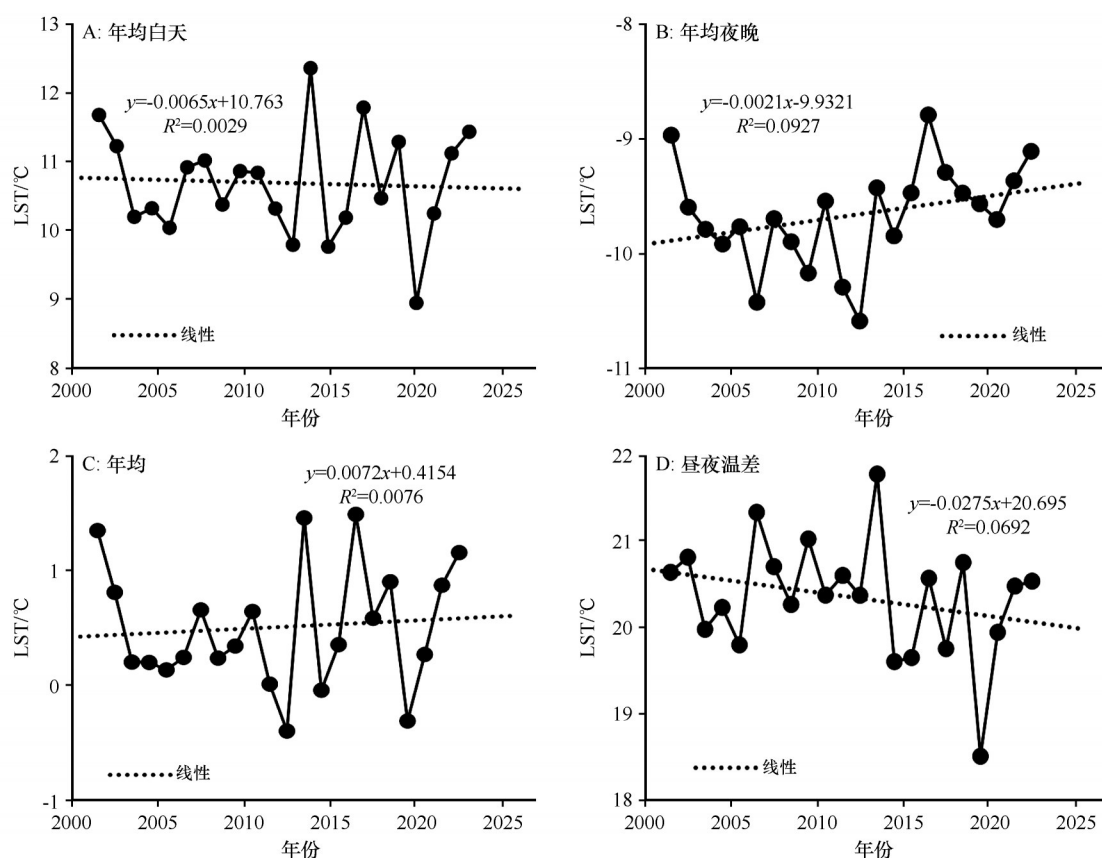


图2 2001—2022年祁连山南坡地表温度年际变化

Fig.2 Interannual variation of land surface temperature on the southern slope of Qilian Mountains from 2001 to 2022

表温度与年均地表温度空间分布相似,有68.19%的区域处于上升趋势,这些区域集中分布在祁连山南坡中部和西部,说明中部和西部区域的地表温度在长期观测中呈现出明显的上升趋势。

### 3.2 地表温度生长季与非生长季时空变化特征

祁连山南坡2001—2022年地表温度在不同季节呈现出显著差异(图4),生长季地表温度呈波动增加趋势,增加速率为 $0.37\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ ,并在 $8.16\sim 10.15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 波动,平均值为 $8.98\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,最低年份和最高年份分别为2015年和2022年。非生长季以 $0.03\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ 速率增加,年增幅较小,非生长季地表温度在 $-8.78\sim -3.72\text{ }^{\circ}\text{C}$ 波动,最低年份和最高年份分别为2004年和2001年。生长季地表温度增温率明显高于非生长季,表明该地区的植被生长、土壤湿度、水汽含量等因素在生长季对地表温度的影响更为显著。

生长季,祁连山南坡地表温度在空间上表现出显著高温效应,祁连山南坡90%以上的区域地表温度均大于 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,整体地表温度 $-1.41\sim 16.90\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。非生长季,地表温度在空间上表现出显著低温效应,为

$-22.19\sim 1.92\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,有99.42%区域小于 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ (图5)。整体上,非生长季和生长季显著低值区均位于门源县北部,主要是由于门源县北部海拔高,大气稀薄,透明度高,地面长波辐射强,大气逆辐射较弱,导致地表温度偏低。

### 3.3 地表温度年内各月时空变化特征

祁连山南坡月均地表温度整体上呈现出先上升后下降的趋势,并以7月为转折点(图6)。在冰冻期(1、2、11、12月),月均地表温度均小于 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,1月为全年最低温( $-12.50\text{ }^{\circ}\text{C}$ ),从3月开始,地表温度逐渐上升,随着生长季的到来,气温开始回升,积雪覆盖面积减小,地表粗糙度增大,地表吸热能力增强,至7月达到全年最高值 $12.11\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

祁连山南坡月均地表温度表现出明显空间异质性(图7)。1月,除大通河和八宝河区域,其他区域地表温度均低于 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;3月,祁连山南坡66.99%的区域地表温度在 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以下,且上述区域主要在海拔 $3000\text{ m}$ 以上,高海拔地区由于太阳辐射较弱与冷空气下沉影响,地表温度普遍较低。4月,地表温度

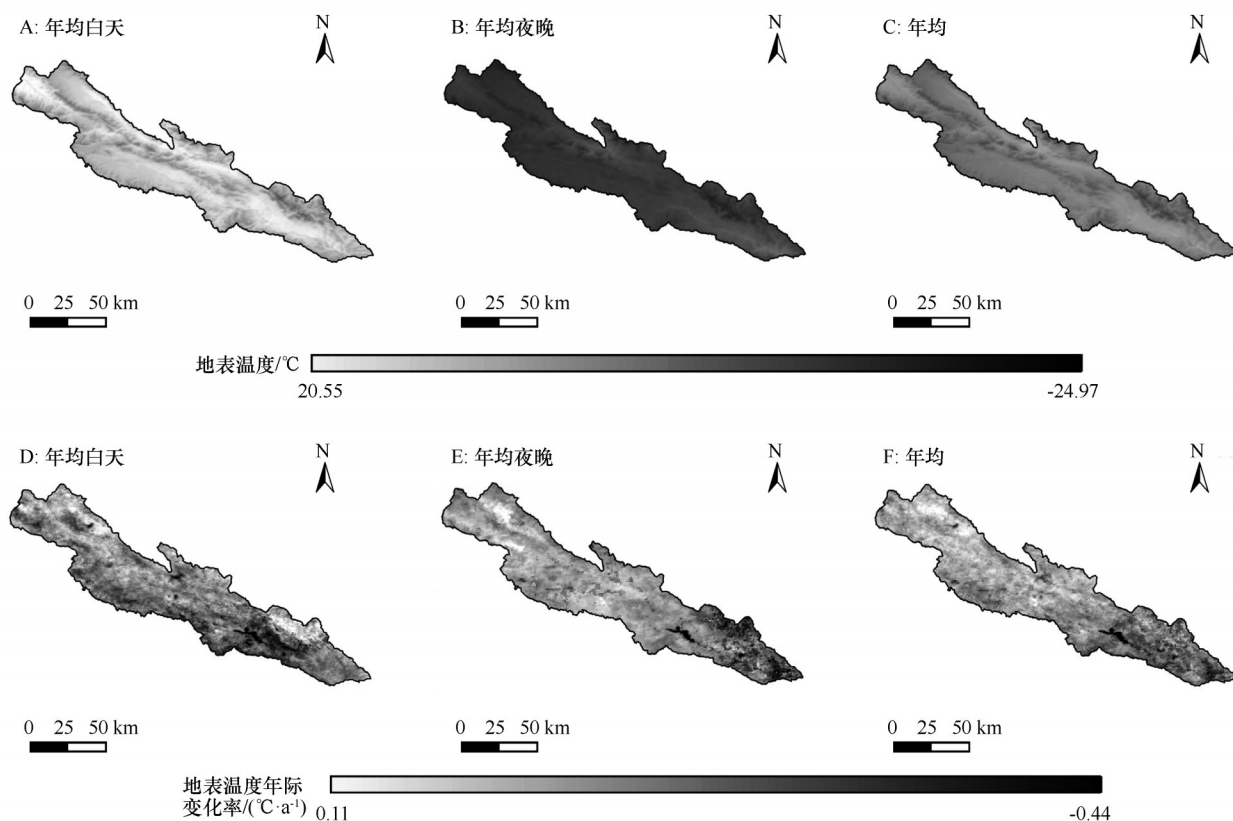


图3 2001—2022年祁连山南坡地表温度及年际变化率空间分布

Fig.3 Spatial distribution of land surface temperature and its interannual variability on the southern slope of Qilian Mountains from 2001 to 2022

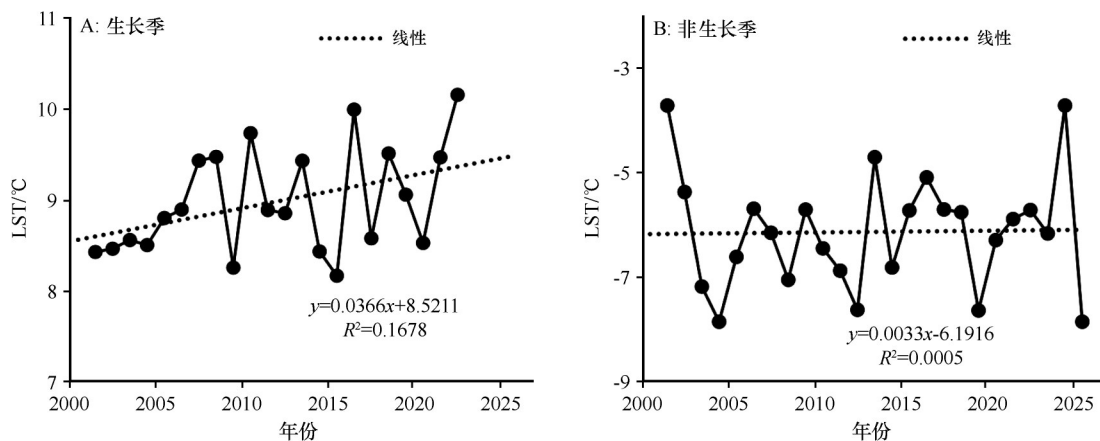


图4 2001—2022年祁连山南坡生长季与非生长季地表温度年际变化

Fig.4 Interannual variation of land surface temperature in growing season and non-growing season on the southern slope of Qilian Mountains from 2001 to 2022

0℃以上区域占比为76.9%;5月,整个祁连山南坡地表温度逐渐升高;至7月,祁连山南坡地表温度皆在0℃以上,且有10.5%的区域大于15℃,其主要分布在托勒河、野牛沟、大通河以及八宝河流域;9月之后,整个祁连山南坡地表温度开始下降;至11月,仅有0.31%的区域地表温度大于0℃,并在次年

1月达到全年最低温。

### 3.4 不同土地利用类型的地表温度特征

不同土地覆盖类型会影响地表热量分布和传递<sup>[23]</sup>。为减小土地利用类型变化带来的干扰,特别关注了土地利用类型未发生变动像元,选取2001、

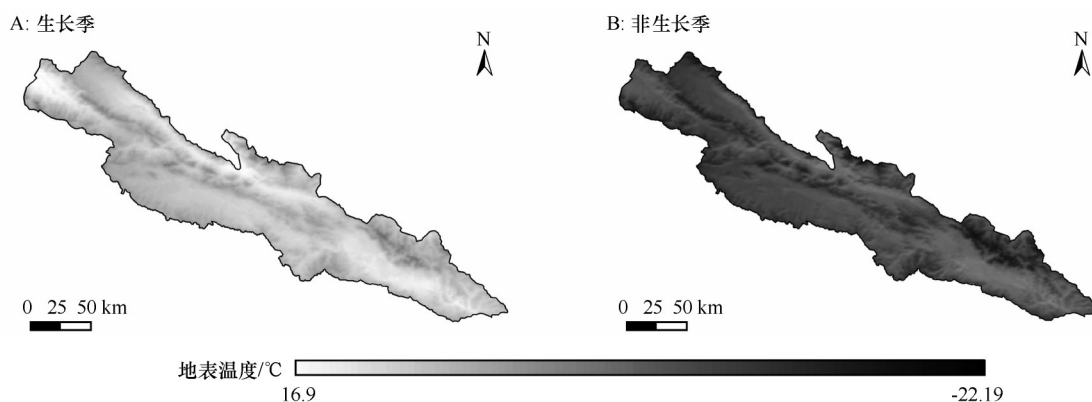


图5 2001—2022年祁连山南坡生长季与非生长季地表温度空间分布

Fig.5 Spatial distribution of land surface temperature in growing season and non-growing season on the southern slope of Qilian Mountains from 2001 to 2022

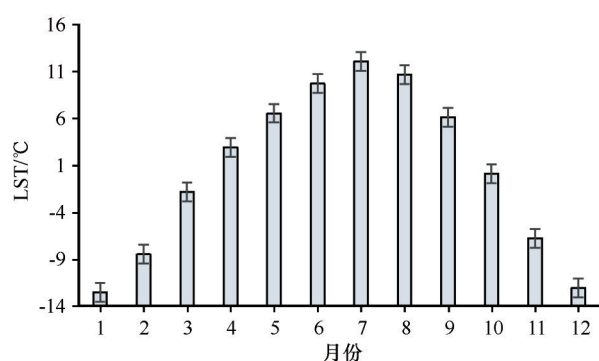


图6 2001—2022年祁连山南坡月均地表温度年内变化

Fig.6 Annual variation of monthly average land surface temperature on the southern slope of Qilian Mountains from 2001 to 2022

2005、2010、2015、2022年土地利用数据。地表温度从低到高依次为裸地<水域<草地<林地<建设用地<耕地(表2)。白天,耕地、草地、建设用地的地表温度较高,而林地和裸地地表温度较低。夜晚,水体地表温度较高。综合来看,裸地地表温度随时间呈下降趋势,并以 $1.65\text{ }^{\circ}\text{C}/5\text{a}$ 速率下降,而水域地表温度随时间呈上升趋势,并以 $0.03\text{ }^{\circ}\text{C}/5\text{a}$ 速率上升。

### 3.5 不同海拔梯度的地表温度变化特征

祁连山南坡垂直梯度性是祁连山南坡山地生态系统重要特征,直接影响了地表温度、植被类型、降水和风速等方面的垂直变化,对山地生态系统的能量平衡、物质循环和水资源形成等具有重要影响<sup>[24]</sup>。为全面研究祁连山南坡不同海拔梯度地表温度的变化特征,将海拔按300 m高差分为11个梯度。年均夜晚、年均白天、年均地表温度与海拔呈

显著负相关关系,表明随海拔升高,地表温度整体呈下降趋势(图8)。年均地表温度递减率为 $0.49\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$ ,其中,白天地表温度递减率为 $0.55\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$ ,夜晚地表温度递减率为 $0.45\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$ ,因此,海拔对地表温度有着直接影响。然而,白天地表温度在海拔2500~3100 m发生突变,地表温度随海拔升高出现了上升趋势,由于该海拔范围受到了季风气候影响,季风气候为该海拔梯度区域输送了暖湿气流,导致地表温度上升<sup>[7]</sup>。

### 3.6 地表温度、气温、降水量和NDVI的空间自相关特性

地表温度、降水量、气温、NDVI相关指数分别为0.54、0.89、0.67、0.41。三者Moran's  $I$ 指数均位于0~1,表明这些因子在空间上存在一定相关性。其中,降水量莫兰指数最高,为0.89,表明降水量空间正相关性最强,NDVI空间自相关性最弱,这种显著性差异与不同因子对环境 and 生态系统的不同影响有关<sup>[25]</sup>。为更深入了解不同影响因子的聚集和离散规律,使用ArcGIS10.8工具得到各因子局部空间自相关聚集图,并分析气温、降水量、NDVI和地表温度局部空间自相关特征。将流域内的各个区域划分为5个聚类类型:不显著、高-高型聚类、高-低型聚类、低-高型聚类以及低-低型聚类。

年均气温局部空间自相关分析表明,高-高型和低-低型区域在祁连山南坡占比为42.17%,表明在祁连山南坡,气温相似区域之间存在明显空间集聚现象,这种正相关关系表明在特定区域内,气温具有一定稳定性(图9A)。高-高型区域主要分布在海拔较低的门源县南部、八宝河流域、大通河流域

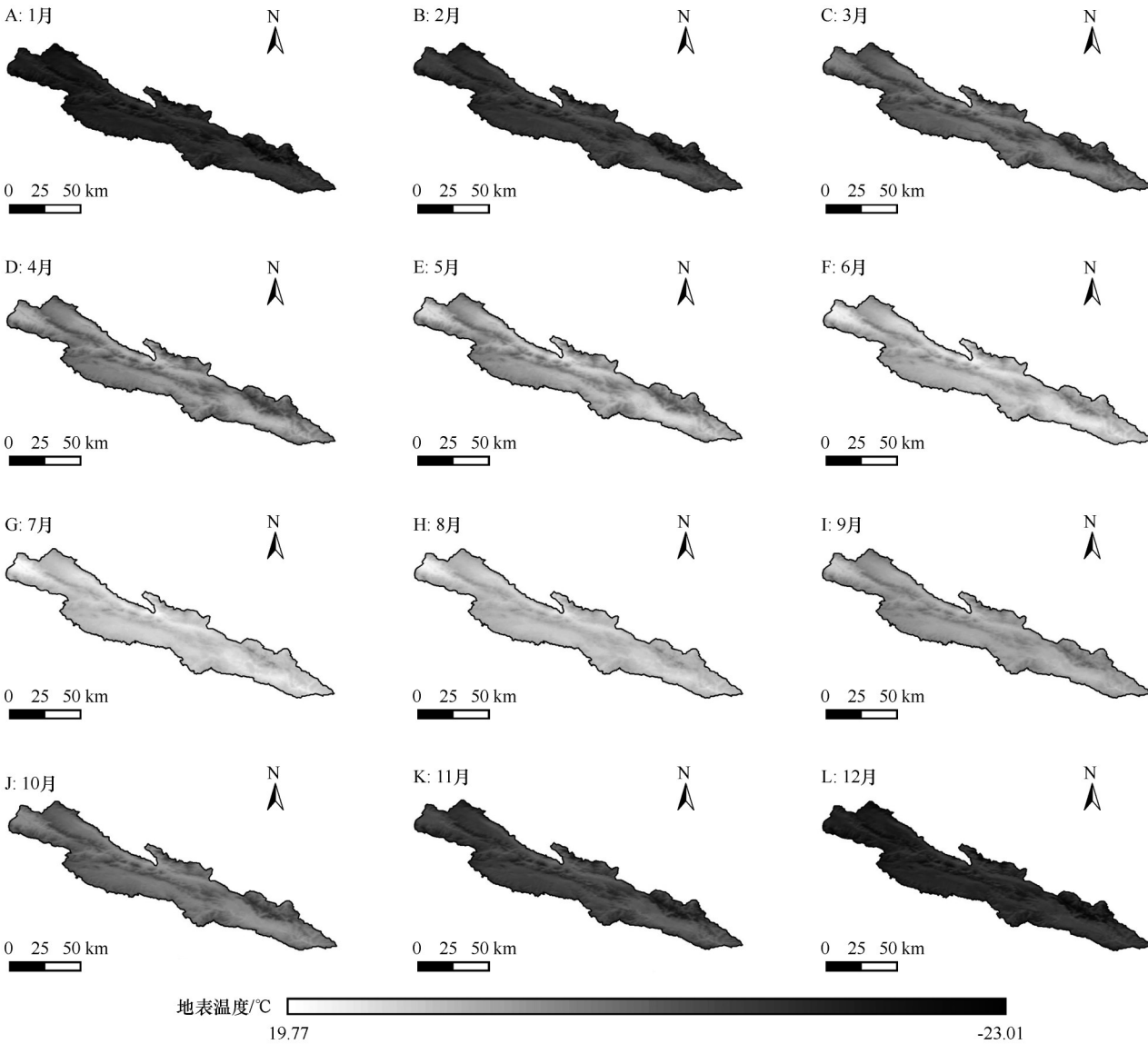


图7 2001—2022年祁连山南坡月均地表温度空间分布  
Fig.7 Spatial distribution of monthly everage land surface temperature on the southern slope of Qilian Mountains from 2001 to 2022

表2 祁连山南坡不同土地利用类型的地表温度(单位: °C)  
Table 2 Land surface temperature of different land use types on the southern slope of the Qilian Mountains (Unit: °C)

| 土地利用<br>类型 | 年份   |       |       |       |       | 年均    | 年均白天  | 年均夜晚   |
|------------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|
|            | 2000 | 2005  | 2010  | 2015  | 2021  |       |       |        |
| 裸地         | 5.36 | -1.56 | -1.57 | -1.58 | -2.91 | -1.83 | 7.56  | -11.23 |
| 建设用地       | 5.03 | 5.03  | 5.03  | 5.03  | 5.03  | 5.07  | 15.88 | -5.74  |
| 水域         | 0.72 | 0.71  | 0.82  | 0.82  | 0.83  | -0.25 | 9.57  | -10.07 |
| 草地         | 0.89 | 0.88  | 0.87  | 0.87  | 0.88  | 0.88  | 11.56 | -9.80  |
| 林地         | 1.87 | 1.86  | 1.86  | 1.86  | 1.92  | 1.87  | 11.12 | -7.37  |
| 耕地         | 5.36 | 5.35  | 5.34  | 5.34  | 5.16  | 5.31  | 16.05 | -5.43  |

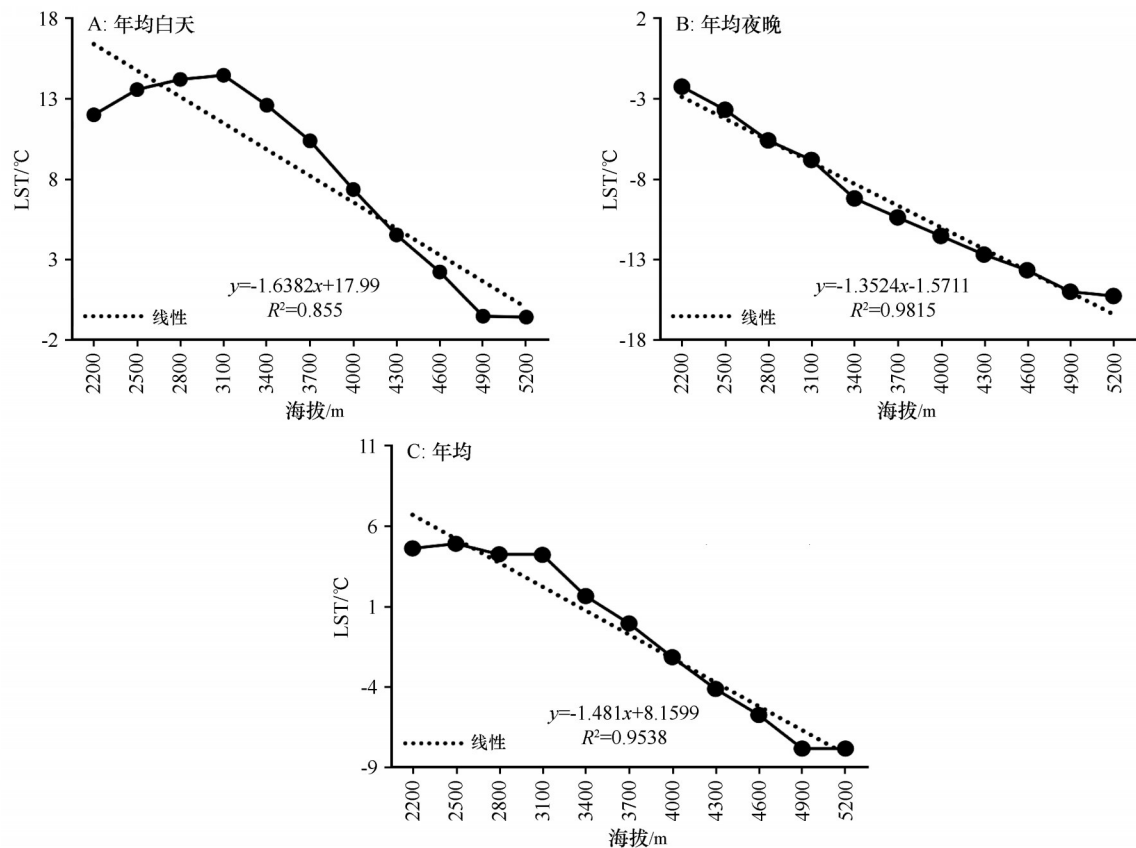


图 8 2001—2022 年祁连山南坡不同海拔的年均、年均白天、年均夜晚地表温度变化  
Fig.8 Annual daytime and nighttime mean land surface temperature changes at different elevations in the Qilian Mountains from 2001 to 2022

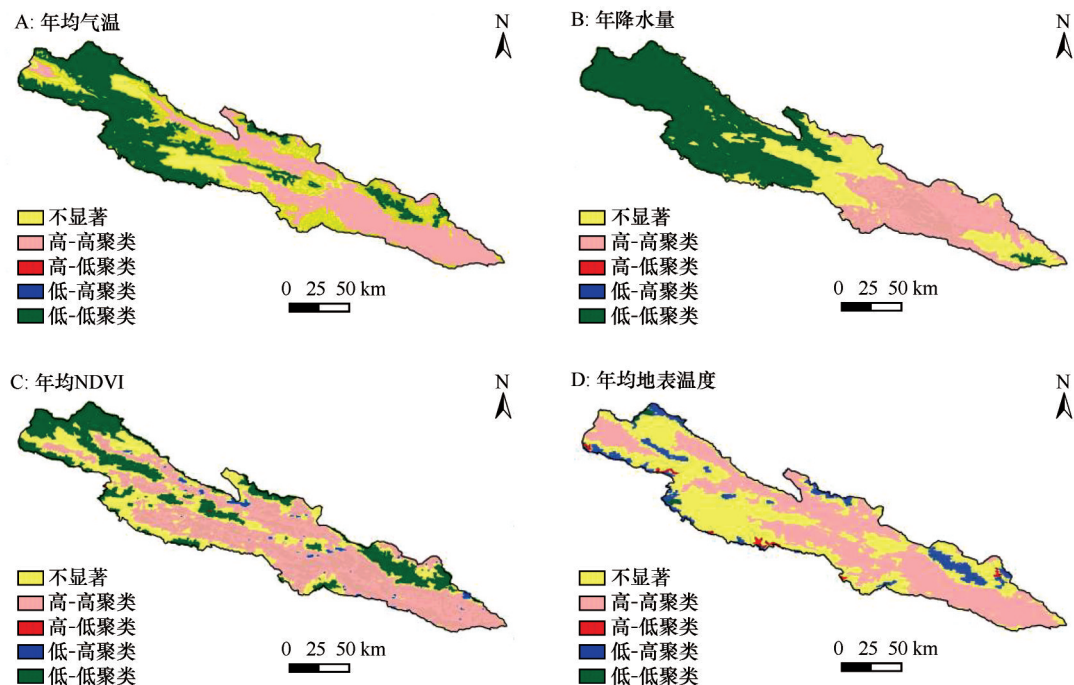


图 9 2001—2022 年祁连山南坡气温、降水量、NDVI 及地表温度聚类分析  
Fig.9 Cluster analysis of air temperature, precipitation, amount of NDVI and LST of Qilian Mountains from 2001 to 2022



附近。低-低型区域主要分布在海拔较高区域,这表明高海拔地区气温较低且相对稳定。

从年降水量局部空间自相关分析结果来看,高-高型和低-低型区域占比达到49.17%,说明在祁连山南坡,降水量相似区域之间存在明显空间集聚现象,这种正相关关系表明在特定区域内,降水量具有一定稳定性和连续性(图9B)。高-高型区域主要分布在门源县大部分区域,该区域可能受到某些大尺度气候系统的影响,如季风、洋流等,导致降水量较高且稳定。低-低型区域则主要分布在祁连山南坡西北部,此外,负相关类型区域均为0个,表明在祁连山南坡,降水量差异较大区域之间不存在明显空间关联性。显著不相关区域在祁连山南坡中部以及东南部有少量分布,表明这些区域降水量与其他区域降水量没有明显空间依赖关系。

从年均NDVI局部自相关分析结果来看,正相关类型(高-高型与低-低型)占据了相当大的比例,分别占祁连山南坡总面积20.21%和20.47%,表明在祁连山南坡,NDVI值相似区域之间存在明显空间集聚现象(图9C)。负相关类型(高-低型与低-高型)比例相对较小,分别占祁连山南坡总面积0.04%和1.13%,不显著相关类型个数最多,占比为58.14%,表明在祁连山南坡,多数区域NDVI值与其他区域NDVI值没有明显空间关联性。

从地表温度局部空间自相关分析结果来看,正相关类型占据了显著优势地位,高-高型和低-低型总占比达到30.16%,高-高型区域主要沿着河流分布,而低-低型区域主要分布在祁连山南坡高海拔和边缘地区(图9D)。相比之下,负相关类型区域占比非常小,高-低型和低-高型仅占0.4%,表明地表温度差异较大区域之间存在较少空间关联性。非显著相关区域占比为59.36%,在祁连山南坡中南部和西部均有分布。就其空间格局而言,正相关类型分布范围较广,呈现较为连续分布态势,负相关类型则多呈零星分布,无明显集中区域,这种分布格局进一步印证了正相关类型在祁连山南坡占据主导地位的事实。

### 3.7 地理探测器分析

驱动单因子探测结果如图10所示。2001—2022年单因子 $q$ 值海拔(0.35)>气温(0.31)>降水量(0.27)>NDVI(0.22)>坡度(0.13)>土地利用(0.12)>坡向(0.02),说明海拔是影响祁连山南坡地表温度

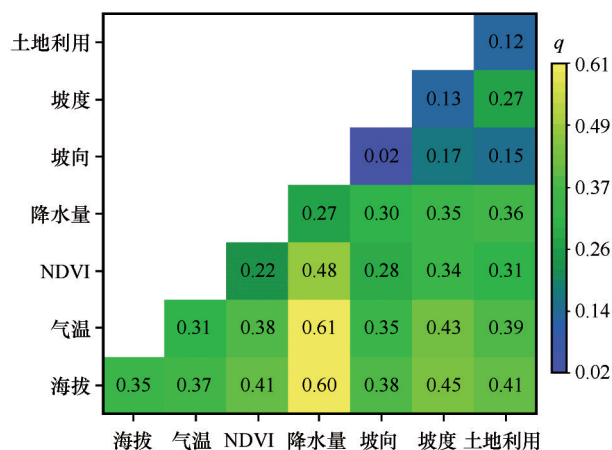


图10 影响因子驱动力

Fig.10 Driving force of influence factors

空间分异的核心因子,而坡向在0.1以下,对地表温度的影响最小。驱动因子交互作用强度从高到低的排序为:降水量 $\cap$ 气温(0.61)>海拔 $\cap$ 降水量(0.60)>降水量 $\cap$ NDVI(0.48)>海拔 $\cap$ 坡度(0.45)>气温 $\cap$ 坡度(0.43)>海拔 $\cap$ 土地利用=海拔 $\cap$ NDVI(0.41)>气温 $\cap$ 土地利用(0.39)>海拔 $\cap$ 气温(0.37)>降水量 $\cap$ 土地利用(0.36)>降水量 $\cap$ 坡度(0.35)=气温 $\cap$ 坡向(0.35)>NDVI $\cap$ 坡度(0.34)>NDVI $\cap$ 土地利用(0.31)>降水量 $\cap$ 坡向(0.30)>NDVI $\cap$ 坡向(0.28)>坡度 $\cap$ 土地利用(0.27)>坡向 $\cap$ 坡度(0.17)>坡向 $\cap$ 土地利用(0.15)。可以看出,海拔、气温、降水量、坡度、坡向、NDVI等因素相互作用,探测值在0.17~0.61,气温 $\cap$ 降水量对地表温度空间分异影响最强,其交互探测器解释力为0.61,其次是降水量 $\cap$ 海拔,解释力为0.60,表明降水量和海拔组合是地表温度空间分异的主要影响因素。NDVI $\cap$ 降水量、坡度 $\cap$ 海拔、坡度 $\cap$ 气温等也具有相对较高解释力,其中坡向与土地利用交互解释力最低。

## 4 讨论

祁连山南坡2001—2022年地表温度总体呈上升趋势,均值为0.51℃,年均增速为0.072℃/10a,远低于赵美亮等<sup>[20]</sup>的研究结论,但地表温度总体变化趋势一致,说明祁连山南坡地表温度相对于大尺度的区域而言变化相对缓慢。地表温度高值区域集中分布在祁连山南坡东南部以及低海拔地区,海拔低,能够接收较多太阳辐射,且地形因素导致散热效果较差,从而使得热量得以积累<sup>[26]</sup>。此外,低海拔区坡度较小,土壤中水分更易保持,而水的比热容较大,散热慢,这些因素共同作用导致祁连山

南坡地表温度偏高。

地表温度空间异质性受到降水量、NDVI、气温、坡度、高程等因子不同程度影响。单一因子控制下,海拔是影响祁连山南坡地表温度空间异质性的主要因子,海拔的 $q$ 值高达0.61,其次是气温( $q=0.60$ )。白天,随着海拔的升高,地表温度呈现出先增大后减小的变化趋势,最大值出现在海拔2 500~3 100 m。根据相关研究<sup>[7]</sup>,海拔2 500~3 100 m受到了季风气候影响,季风气候为该海拔梯度输送了暖湿气流,导致地表温度上升,而祁连山南坡降水量也呈现出类似的变化趋势。多位学者也曾在相关领域开展过研究并取得了相似的结果<sup>[13]</sup>。在双因子控制下,地表温度空间格局的形成受到了降水量与气温以及降水量与海拔的共同调控,其他因子交互的解释力较小,但对地表温度空间异质性的影响不容忽视。

在全球气候变暖的大背景下,地处青藏高原东北部的祁连山南坡地表温度发生了明显变化,由于高海拔区域地形复杂与生态脆弱,下垫面能量转化和物质运移变得更加容易,虽然大范围的冻土融化、季节性积雪减少以及冰川持续消融引发的吸热过程导致地表温度出现阶段性下降,但随着冰雪消融后地表反照率的降低和吸收太阳辐射能力的提高,地表温度极易转向持续升高的状态<sup>[27]</sup>。植被作为衡量区域生态敏感性和脆弱性的重要标准,在地表温度的变化过程中起着至关重要的作用,生态修复在降低区域地表温度方面起到了一定的贡献作用,但祁连山南坡特殊的地理环境,使得人类的活动和影响范围受到很大的限制。

## 5 结论

2001—2022年祁连山南坡地表温度呈波动上升的趋势,白天地表温度递减率为 $0.065\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ ,夜晚地表温度递增率为 $0.92\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ ,年均递增率为 $0.072\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ ,生长季地表温度增温率为 $0.0366\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ ,而非生长季地表温度增温率为 $0.033\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ ,说明生长季对于全球气候变暖的响应较非生长季明显。空间变化上,地表温度空间分布与气温空间分布较为相似,高值区集中分布在河谷地区,低值区主要分布在高海拔地区裸岩及冰川区域。

随海拔升高,祁连山南坡地表温度整体呈下降趋势,年均地表温度递减率为 $0.49\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$ ,白天

地表温度递减率为 $0.55\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$ ,夜晚地表温度递减率为 $0.45\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$ 。不同土地利用类型对地表温度响应也存在差异,裸地地表温度较其他土地覆盖类型下降明显,而水域较其他土地覆盖类型上升明显。

在驱动因素方面,海拔是影响祁连山南坡地表温度的首要因素,气温次之,其变化直接影响地表热量交换。当各因子协同作用时,它们对地表温度影响进一步加强,气温和降水量耦合对地表温度解释力最大。在湿润地区,高温可能伴随较高的降水量,这有助于调节地表温度,而在干燥地区,高温可能导致土壤干燥,进而影响地表温度。这种耦合关系揭示了自然系统内部的复杂相互作用,进一步表明了气温和降水对地表温度的共同影响。

## 参考文献:

- [1] 毛克彪,严毅博,赵冰,等.中国地表温度时空变化及驱动因素分析[J].灾害学,2023,38(2):60-73.
- [2] Anupam P, Arun M, Subhanil G, et al. Analysis of spectral indices-based downscaled land surface temperature in a humid subtropical city [J]. International Journal of Image and Data Fusion, 2023, 14(4): 336-358.
- [3] 乔丽,吴林荣,张高健,等.中国近50 a地表温度时空变化特征分析[J].水土保持通报,2015,35(5):323-326.
- [4] 程姗姗,于海鹏,任钰,等.中国干旱半干旱区气候异常影响机理研究进展[J].中国沙漠,2023,43(3):21-35.
- [5] 王宾宾,马耀明,马伟强,等.青藏高原那曲地区MODIS地表温度估算[J].遥感学报,2012,16(6):1289-1309.
- [6] 王惠民.基于MODIS的地表温度时空变化特征研究[D].石家庄:河北地质大学,2022.
- [7] 胡盼盼.基于MODIS数据的青藏高原2003—2020年地表温度时空变化分析[D].北京:中国地质大学(北京),2022.
- [8] 朱智,师春香,谷军霞,等.近10 a来青藏高原地表温度时空变化特征分析[J].科学技术与工程,2020,20(10):3828-3837.
- [9] 康利刚,曹生奎,曹广超,等.青海湖流域地表温度时空变化特征研究[J].干旱区地理,2023,46(7):1084-1097.
- [10] 邱丽莎,何毅,张立峰,等.祁连山MODIS LST时空变化特征及影响因素分析[J].干旱区地理,2020,43(3):726-737.
- [11] 周刊社,罗骅翻,杜军,等.西藏高原地温对气温变化的响应[J].中国农业气象,2015,36(2):129-138.
- [12] 钱大文,曹广民,杜岩功,等.2000—2015年祁连山南坡生态系统服务价值时空变化[J].生态学报,2020,40(4):1392-1404.
- [13] 管延龙,王让会,李成,等.基于MODIS数据的天山区域地表温度时空特征[J].应用生态学报,2015,26(3):681-688.
- [14] Vancutsem C, Ceccato P, Dinku I T, et al. Evaluation of MODIS Land surface data to estimate air temperature in different ecosystems over Africa [J]. Remote Sensing of Environment, 2010,

- 114:449–465.
- [15] 付建新,曹广超,郭文炯,等.1980–2018年祁连山南坡土地利用地形梯度变化及其地形因子地理探测[J].水土保持研究,2021,28(6):371–381.
- [16] Zhao W, Duan S.Reconstruction of daytime land surface temperatures under cloud-covered conditions using integrated MODIS/Terra land products and MSG geostationary satellite data [J].Remote Sensing of Environment,2020,247:111931.
- [17] 程丹妮,王颖琪,程勇翔,等.新疆典型沙漠和绿洲植被–水汽地表温度相关性分析[J].干旱区地理,2022,45(2):456–466.
- [18] 彭璐璐,李楠,郑智远,等.中国居民消费碳排放影响因素的时空异质性[J].中国环境科学,2021,41(1):463–472.
- [19] 王劲峰,徐成东.地理探测器:原理与展望[J].地理学报,2017,72(1):116–134.
- [20] 赵美亮,曹广超,曹生奎,等.1980–2017年青海省地表温度时空变化特征[J].干旱区研究,2021,38(1):178–187.
- [21] 杨涵涓,封国林.2013年盛夏中国持续性高温事件诊断分析[J].高原气象,2016,35(2):484–494.
- [22] 童珊,曹广超,闫欣,等.祁连山南坡2000–2020年植被覆盖时空演变及其驱动因素分析[J].山地学报,2022,40(4):491–503.
- [23] 郭瑞,刘蔚,李宗省,等.祁连山甘肃片区土地利用变化特征及驱动力[J].中国沙漠,2023,43(3):188–198.
- [24] 田浩,刘琳,张正勇,等.2001–2020年中国地表温度时空分异及归因分析[J].地理学报,2022,77(7):1713–1729.
- [25] Phompila C, Lewis M, Ostendorf B, et al.MODIS EVI and LST temporal response for discrimination of tropical land covers[J]. Remote Sensing,2015,7(5):6026–6040.
- [26] Mostovoy V G, King L R, Reddy R K, et al.Statistical estimation of daily maximum and minimum air temperatures from MODIS LST data over the State of Mississippi [J].GIScience & Remote Sensing,2006,43(1):78–110.
- [27] 郑诚蔚,邓晓红,李宗省,等.甘肃省河西地区水源涵养功能与人类活动强度演变[J].中国沙漠,2024,44(1):189–200.

## Spatial-temporal characteristics and influencing factors of land surface temperature on the southern slope of Qilian Mountains from 2001 to 2022

Li Xiaoyan<sup>1</sup>, Cao Guangchao<sup>1,2</sup>, Chen Zongyan<sup>1,2</sup>, Yuan Jie<sup>1,2</sup>, Sun Ziting<sup>1</sup>, Tang Jianting<sup>1</sup>

(1.Ministry of Education Key Laboratory of Tibetan Plateau Land Surface Processes and Ecological Conservation / College of Geographical Science / Qinghai Provincial Key Laboratory of Physical Geography and Environmental Process, Qinghai Normal University, Xining 810008, China; 2.Academy of Plateau Science and Sustainability, People's Government of Qinghai Province and Beijing Normal University, Xining 810008, China)

**Abstract:** Based on MOD11A2 data, DEM, land use type data, meteorological data (precipitation, air temperature and normalized difference vegetation index (NDVI) of Qilian Mountains from 2001 to 2022, land surface temperature (LST) were analyzed using trend analysis, linear regression and geographic probe model, and the driving factors of LST were discussed. The results show that: (1) In the time dimension, the LST on the southern slope of Qilian Mountains show upward trend from 2001 to 2022, and the LST warming rate in growing season (from May to September) is higher than that in non-growing season. The daytime LST showed an insignificant decline trend ( $-0.065\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ ), the nighttime LST showed a significant increase trend ( $0.21\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ ), while the annual LST increased at the rate of  $0.072\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ . The monthly LST increased first and then decreased, and it was symmetrical with July as the turning point. (2) In the spatial dimension, the high LST regions are mainly distributed in the valley area. The decreasing rate of LST with elevation was  $0.59\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$ . The order of LST from low to high was as follows: bare land < water < grassland < forest land < land of construction < cultivated land. (3) Under the influence of single factor, altitude is the main factor affecting the change of LST, and air temperature is the second. The coupling of air temperature and precipitation had the greatest explanatory power ( $q = 0.61$ ).

**Key words:** land surface temperature; spatial and temporal variations; impact factors; southern slope of Qilian Mountains