

doi: 10.6046/gtzyyg.2019.02.23
引用格式：熊俊楠,李伟,程维明,等.高原地区LST空间分异特征及影响因素研究——以桑珠孜区为例[J].国土资源遥感,2019,31(2):164-171.(Xiong J N,Li W,Cheng W M,et al.Spatial variability and influencing factors of LST in plateau area;Exemplified by Sangzhuzi District[J].Remote Sensing for Land and Resources,2019,31(2):164-171.)

高原地区LST空间分异特征及影响因素研究

——以桑珠孜区为例

熊俊楠^{1,2}, 李伟¹, 程维明², 范春捆³, 李进¹, 赵云亮¹
(1. 西南石油大学土木工程与建筑学院, 成都 610500; 2. 中国科学院地理科学与资源研究所资源与环境信息系统国家重点实验室, 北京 100101;
3. 西藏自治区农牧科学院农业研究所, 拉萨 850000)

摘要：揭示高原地区地表温度(land surface temperature, LST)空间分异特征及影响因素对当地气候变化研究的意义重大。现有研究主要分析了LST与单因子的关系,但以高原地区为研究区,结合多方面因子进行LST空间分异特征与影响因素定量分析的研究还相对较少。文中以西藏自治区日喀则市桑珠孜区为例,利用Landsat8遥感数据,采用辐射传输方程算法和普通性单通道算法反演研究区LST;应用地理探测器模型中的因子探测器与交互探测器分别定量探测出单因子与多因子共同作用时对LST的影响程度。研究结果表明,可量化因子中,LST随坡向度数的增加呈现出先增加后降低再增加的趋势,其他因子与LST间均呈明显的负相关关系,但下降速度存在差异;海拔是影响高原地区LST空间分布与分异特征的最主要因素,其后依次为归一化植被指数(normalized difference vegetation index, NDVI)、坡向、归一化水汽指数(normalized difference moisture index, NDMI)、土壤类型、坡度与年均降水量;高原地区LST的空间分布与分异特征的形成是多种因子共同作用的结果,所有因子在交互作用下均具有协同增强作用,海拔与坡向、海拔与NDMI以及海拔与NDVI的影响最为显著。

关键词：Landsat8; 高原地区; 地表温度(LST); 影响因素; 地理探测器

中图法分类号：P 237; P 94 **文献标志码：**A **文章编号：**1001-070X(2019)02-0164-08

0 引言

地表温度(land surface temperature, LST)是地球表面重要的水文和气象参数,揭示高原地区LST空间分异特征及影响因素对高原地区气候变化研究的意义重大。从宏观角度看,影响LST空间分布的因素主要包括地貌、气候和下垫面3个方面。目前,从自然因素和下垫面因素探讨LST空间分异特征的研究较多。

很多学者利用海拔、土壤特性和坡度等因子研究了LST空间分异特征。Scarano等^[1]根据不同海拔和LST的调查数据,得到不同季节LST的海拔梯度平均为3.5~4.6℃/km; Roşca等^[2]研究发现,

沙质土壤最易出现地表高温,其次是黑钙土和褐土; Kerchove等^[3]发现LST空间和时间上的变化主要取决于气象条件、地表覆盖和土壤特征的变化。不少研究还发现,归一化植被指数(normalized difference vegetation index, NDVI)与LST呈明显的负相关关系^[4-5],在一定程度上可以用NDVI表征LST的分布情况。此外,钱乐祥等^[6]还发现在表征地表热特征方面,归一化水汽指数(normalized difference moisture index, NDMI)也是一个较好的指标;文路军等^[7]和孙常峰等^[8]也发现NDMI与LST之间存在着显著的负相关关系,并且两者的最佳拟合关系为二项式拟合而非线性拟合。然而,目前对LST分异特征的研究大多局限于单方面因子与LST的关系,忽略了多方面因子共同作用时对LST空间分布

收稿日期: 2018-04-10; 修订日期: 2018-06-07
基金项目: 中国水利水电科学研究院全国山洪灾害调查评价项目“全国山洪灾害调查评价成果汇总及图件制作”(编号: SHZH-IWHR-57)、国家自然科学基金项目“基于人类动力学的面向震后救援的人员在地理建筑空间的分布规律研究”(编号: 51774250)、西藏自治区科技支撑计划项目“西藏主要气象灾害对农业的影响研究与数据库建设”(编号: 省809)和西南石油大学科技创新团队项目“测绘遥感”(编号: 2017CXTD09)共同资助。
第一作者: 熊俊楠(1981-),男,在站博士后,副教授,主要从事遥感地理信息系统理论与灾害风险分析方面的研究。Email: neu_xjn@163.com。
通信作者: 程维明(1973-),男,博士,研究员,主要从事数字地形地貌研究。Email: chengwm@lreis.ac.cn。

与分异特征的影响。同时,以高原地区作为研究区并且结合地貌(海拔、坡度和坡向等)、气候(降水、空气湿度等)和下垫面(土地类型、土壤类型等)3个方面因素,进行 LST 空间分异特征与影响因素定量分析的研究还相对较少。

本文选取地处青藏高原地区的日喀则市桑珠孜区为研究区,使用 Landsat8 数据,采用 2 种典型的单波段反演算法进行研究区 LST 的反演,并对 LST 的反演结果进行检核验证。在分析桑珠孜区地貌、气候与下垫面因素的基础上,利用 LST 反演结果、SRTM 数字高程模型(digital elevation model, DEM)数据与年均降水数据,应用地理探测器模型中的因子探测器定量分析各单方面因子对 LST 空间分布与分异特征的影响;应用交互探测器定量分析多因子共同作用对 LST 空间分布及分异特征的影响,旨在为高原地区 LST 空间分异特征与形成机制的研究提供借鉴,为区域气候变化研究提供参考。

1 研究区概况与数据源

1.1 研究区概况

桑珠孜区位于西藏自治区的南部,日喀则市东部,区域总面积为 3 665 km²,地理坐标在 E88°27′~89°41′,N28°56′~29°39′之间;区内地形复杂,地势起伏较大,海拔在 3 758~5 778 m 之间,平均海拔在 4 000 m 以上,主要由宽谷和湖盆组成(图 1)。桑珠孜区气候特征多样,全区年平均气温为 6.3℃,区域日均温差达 14℃以上,年均降水量为 400 mm 左右,年均日照时间达 3 300 h,无霜期约 120 d。桑珠孜区拥有丰富的矿产、太阳能和药材资源以及极具潜力的旅游产业,开发和利用前景较为乐观。

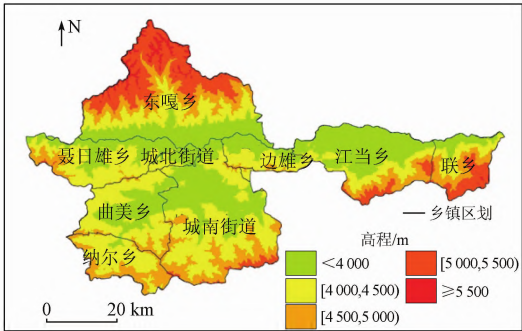


图 1 研究区位置及高程

Fig. 1 Location and elevation of study area

1.2 数据源及其预处理

本文的主要基础数据包括覆盖研究区的 Landsat8 遥感影像、90 m 空间分辨率的 SRTM DEM 数据、多年平均降水数据以及土地利用与土壤类型数据。

其中 Landsat8 数据和 SRTM DEM 数据均来源于地理空间数据云网站(<http://www.gscloud.cn/>), Landsat8 数据标识为 LC81390402015250LGN00,条带号为 139,行编号为 40,云覆盖量为 0.66%;年均降水数据来源于国家地球系统科学共享平台(<http://www.geodata.cn/>);土壤类型与土地利用数据均来源于地理国情监测平台(<http://www.dsac.cn/>),数据的整体质量较好。

由于下载的 Landsat8 数据已经过基于地形的几何纠正,故本文不再进行几何纠正。海拔、坡度和坡向均由 SRTM DEM 数据获取。

2 研究方法

2.1 LST 反演算法

2.1.1 辐射传输方程算法

辐射传输方程算法(radioactive transfer equation algorithm, RTE)是一种基于大气辐射传输模型的传统算法。在整个地气系统的辐射传输过程中,卫星接收的热红外辐射能量 L_{λ} 主要由经大气衰减后传感器接收的热辐射能量、大气上行辐射亮度 $L_{\uparrow}$ 和下行辐射亮度 $L_{\downarrow}$ 这 3 部分构成。卫星接收到的热红外辐射亮度值即辐射传输方程^[9],其公式为

$$L_{\lambda} = [\varepsilon B(T_s) + (1 - \varepsilon)L_{\downarrow}] \tau + L_{\uparrow}, \quad (1)$$

式中: ε 为地表比辐射率; $B(T_s)$ 为黑体辐射亮度; T_s 为地面真实温度, K; $L_{\downarrow}$ 和 $L_{\uparrow}$ 分别为大气下行和大气上行辐射亮度, $W \cdot m^{-2} \cdot Sr^{-1} \cdot \mu m^{-1}$; τ 为大气透过率。

假设地表、大气对热辐射具有朗伯体性质,根据辐射传输方程可得出与地表真实温度正相关的黑体辐射亮度 $B(T_s)$,即

$$B(T_s) = [L_{\lambda} - L_{\uparrow} - \tau(1 - \varepsilon)L_{\downarrow}] / (\tau\varepsilon), \quad (2)$$

式中 $\tau, L_{\uparrow}$ 和 $L_{\downarrow}$ 3 个参数可以通过美国国家航空航天局官网(<http://atmcorr.gsfc.nasa.gov/>)获得(表 1)。

表 1 LST 反演参数
Tab. 1 LST inversion parameters

时间	τ	$L_{\uparrow} / (W \cdot m^{-2} \cdot Sr^{-1} \cdot \mu m^{-1})$	$L_{\downarrow} / (W \cdot m^{-2} \cdot Sr^{-1} \cdot \mu m^{-1})$
2015-09-07 T12:35:26	0.93	0.45	0.79

在估算出黑体辐射亮度值 $B(T_s)$ 后,根据普朗克定律的反函数,可得到地面的真实温度值,其公式为

$$T_s = K_2 / \ln \left(\frac{K_1}{B(T_s)} + 1 \right), \quad (3)$$

式中 K_1 和 K_2 为常数。TIRS 10 波段的 K_1 与 K_2 分别为 $774.89 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{Sr}^{-1} \cdot \mu\text{m}^{-1}$ 和 $1\,321.08 \text{ K}$; TIRS 11 波段中, K_1 与 K_2 分别为 $480.89 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{Sr}^{-1} \cdot \mu\text{m}^{-1}$ 和 $1\,201.14 \text{ K}$ 。

2.1.2 普适性单通道算法

普适性单通道算法 (single channel algorithm, SC) 是由 Jiménez - Muñoz 等^[10] 在 2003 年提出的适用于热红外单波段的 LST 反演算法。2014 年 Jiménez - Muñoz 等^[11] 在原有 SC 算法的基础上, 增加了针对 Landsat8 数据的大气参数, 即

$$T_s = \gamma [(\psi_1 L_{\text{sen}} + \psi_2) / \varepsilon + \psi_3] + \delta, \quad (4)$$

$$\gamma \approx T_{\text{sen}}^2 / b_\gamma L_{\text{sen}}, \quad (5)$$

$$\delta \approx T_{\text{sen}} - T_{\text{sen}}^2 / b_\gamma, \quad (6)$$

式中: b_γ 为参数, 对于 TIRS 10 波段, $b_\gamma = 1\,324 \text{ K}$, 对于 TIRS 11 波段, $b_\gamma = 1\,199 \text{ K}$; L_{sen} 为影像像元所对应的光谱辐射值; T_{sen} 表示由热红外波段转换出的亮温值; ψ_1, ψ_2, ψ_3 分别为中间变量, 为避免大气水汽含量的影响, 故采用原始推导公式来计算, 即

$$\psi_1 = \frac{1}{\tau}, \psi_2 = -L_\downarrow - L_\uparrow, \psi_3 = L_\downarrow. \quad (7)$$

2.2 影响因素分析方法

地理探测器模型是王劲峰等^[12] 基于地理空间分异理论提出的一种能够探测空间分异性、揭示其背后驱动因子及因子间相对重要性与影响模式的统计学方法。该模型通过因子“解释力”或“贡献度”统计量衡量空间分异性、探测影响因子与分析因子间的交互关系。其基本思想是: 如果一种现象的发生总是和某些因子在空间分布上趋于一致, 则可以认为两者在空间上存在一定的关联性。通过对“现象—因子”间变化趋势的分析, 尝试找出与这种现象在空间变化上具有显著一致性的因子, 以定量探测结果中统计量较高的因子, 作为对该现象有较强解释力和贡献度的因子^[13]。近年来, 地理探测器模型在地理要素格局演变及地域空间分异等方面研究中的应用非常广泛^[14-15]。

2.2.1 因子探测器

因子探测器通过因子“解释力”或“贡献度”的大小定量反映各类因子对 LST 空间分异特征的影响程度。其中, 影响因子 A 对 LST 产生空间分异的解释力大小 P 可以表达为^[12]

$$P = 1 - \frac{\sum_{h=1}^L N_h \sigma_h^2}{N \sigma^2}, \quad (8)$$

式中: N_h 为因子 A 中类型为 h 的样本数; σ_h^2 为因子 A 中类型 h 内的样本方差; L 为因子 A 中的类型总数; N 为整体的样本总数; σ^2 为整体的样本方差 (离散方差), 当 $\sigma^2 \neq 0$ 时, 该模型成立。 P 的值域范围在 $[0, 1]$ 之间, P 越接近于 1, 该因子对 LST 产生空间分异的解释力与影响力就越强。

2.2.2 交互探测器

交互探测器主要是通过因子交互后的解释力大小来定量反映因子间的相对重要性以及对 LST 产生空间分异的影响模式。假设 $P(A)$ 与 $P(B)$ 分别是影响因子 A 与 B 对 LST 产生空间分异的解释力, $P(A \cap B)$ 是影响因子 A 与 B 交互后的解释力, 则在多因子共同作用下的影响模式主要有 5 种^[16]。

- 1) 非线性减弱: $P(A \cap B) < \min[P(A), P(B)]$ 。
- 2) 单线性减弱: $\min[P(A), P(B)] < P(A \cap B) < \max[P(A), P(B)]$ 。
- 3) 双线性增强: $P(A \cap B) > \max[P(A), P(B)]$ 。
- 4) 相互独立: $P(A \cap B) = P(A) + P(B)$ 。
- 5) 非线性增强: $P(A \cap B) > P(A) + P(B)$ 。

2.3 LST 影响因素分析

2.3.1 影响因子选取

根据物质的热辐射原理, LST 受到地表辐射收支与能量平衡过程的控制^[2]。在桑珠孜区等高原地区, 地形、植被覆盖、土地利用和土壤特性等引起的地表辐射差异, 直接影响局部地区的地表净辐射。在参考众多学者的研究成果^[17-20] 后, 本文选择海拔、NDVI、土壤类型和 NDMI 等 8 类因子探究高原地区 LST 的分异特征与形成机理。

2.3.2 NDMI 与 NDVI 获取

高原地区的植被覆盖状况与地表水汽含量是影响区域气候变化及地表热特征的重要来源。NDVI 和 NDMI 可以分别表征区域内植被的覆盖程度及地表的水汽特征。其中, NDVI 定义为^[20]

$$NDVI = \frac{\rho_{\text{Nir}} - \rho_{\text{Red}}}{\rho_{\text{Nir}} + \rho_{\text{Red}}}, \quad (9)$$

式中 ρ_{Nir} 与 ρ_{Red} 分别为 Landsat8 OLI 的第 5 与第 4 波段的反射率。NDVI 值域范围在 $[-1, 1]$ 之间, 通常正值表示有植被覆盖的区域, 值越大植被覆盖度越高; 0 值表示裸土等基本无植被覆盖的区域; 负值则一般表示水体、冰、雪等区域。

NDMI 则是利用 Landsat8 OLI 的近红外波段与中红外波段反射率提取。NDMI 定义为^[20]

$$NDMI = \frac{\rho_{\text{Nir}} - \rho_{\text{Mir}}}{\rho_{\text{Nir}} + \rho_{\text{Mir}}}, \quad (10)$$

式中 ρ_{Mir} 为 Landsat8 OLI 的第6波段的反射率。 $NDMI$ 值域范围在 $[0,1]$ 之间,通常高值对应水汽含量高的植被冠层与水体等物质;低值则对应岩石、建筑物等水汽含量较低的地物。

2.3.3 统计分析

为了研究本文所选的8类因子对高原地区 LST 空间分异特征的影响,首先利用 ArcGIS 软件中的数据管理工具在研究区内创建 3 000 个随机点;然后利用提取分析工具分别提取随机点处的 LST 值与海拔、NDVI 和 NDMI 等信息。由于 NDVI 负值在针对植被覆盖及 LST 的相关研究中,参考价值不大,故只保留 $NDVI > 0$ 且同时含有其他 7 类因子信息的随机点开展进一步的研究。为了能较为清晰地反映 LST 与各类因子间的关系,生成 LST 与海拔、坡度、坡向、年均降水量、NDVI 和 NDMI 等 6 类可量化

因子间的散点图,并构建出 LST 与各类因子间的最佳拟合关系,以决策系数 R^2 来描述 LST 与各因子间的相关程度。自然断点法可以根据数据的分布规律自然分组,避免人为因素干扰,提高研究结果的可靠性与说服力^[21]。在进行地理探测器因子探测与交互探测前,将土地类型和土壤类型这 2 类不可量化因子按属性分层,采用自然断点法将其他 6 类可量化因子值分别重分类为 5 层,每层随机点均达到反映对象真实性质的的大样本要求。

3 结果与分析

3.1 LST 反演结果与验证

研究区 Landsat8 数据的 LST 反演结果如图 2 和表 2 所示。

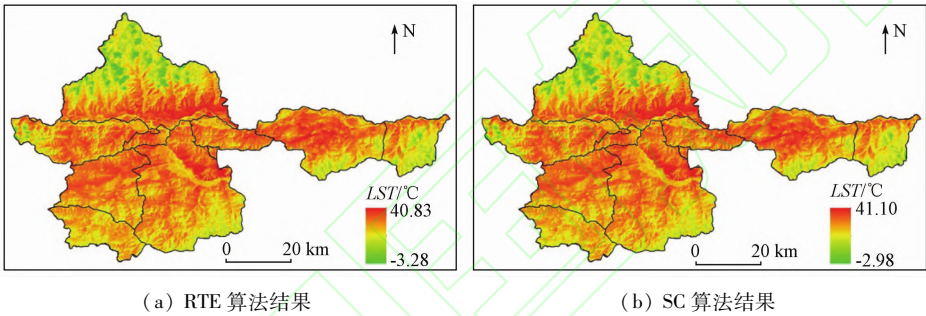


图 2 研究区 LST 反演结果
Fig. 2 Inversion results of LST in the study area

表 2 LST 反演结果对比

Tab. 2 Comparison of LST inversion results (°C)

时间	LST 反演算法	最小值	最大值	平均值	标准差
2015-09-07 T12:35:26	RTE 算法	-3.28	40.83	23.83	7.07
	SC 算法	-2.98	41.10	24.11	7.08

从空间分布来看,2 种算法反演结果的空间分布基本一致,LST 较高的地区均位于研究区内海拔较低的宽谷、湖盆地区;而在海拔较高的区域,LST 则相对较低。从反演结果看,2 种算法的反演结果十分接近,LST 均值相差 0.28 °C,最大值与最小值分别相差 0.27 °C 与 0.3 °C,标准差分别为 7.07 °C

与 7.08 °C,这与研究区地形复杂,气候多样的特点相吻合。通过与同时段研究区气象站点监测的气象数据对比,表明 Landsat8 数据的 LST 反演结果可靠性较高。

3.2 LST 与影响因子的相互关系

利用以“ $NDVI > 0$ ”的属性筛选后含有 LST 值与其他 7 类影响因子信息的 1 183 个随机点来研究各类因子对 LST 空间分布与分异特征的影响。同时,构建出 6 类可量化因子与 LST 间的最佳拟合关系。可量化因子与 LST 的散点图如图 3 所示,全部影响因子的空间分布情况如图 4 所示。

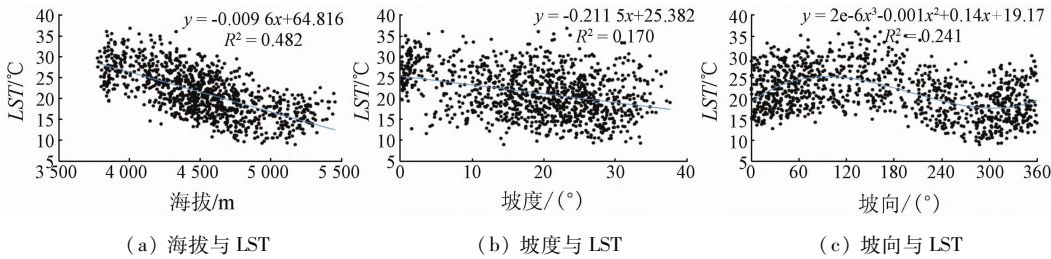


图 3-1 可量化影响因子与 LST 的散点图

Fig. 3-1 Scatter plots of quantifiable influence factors and LST

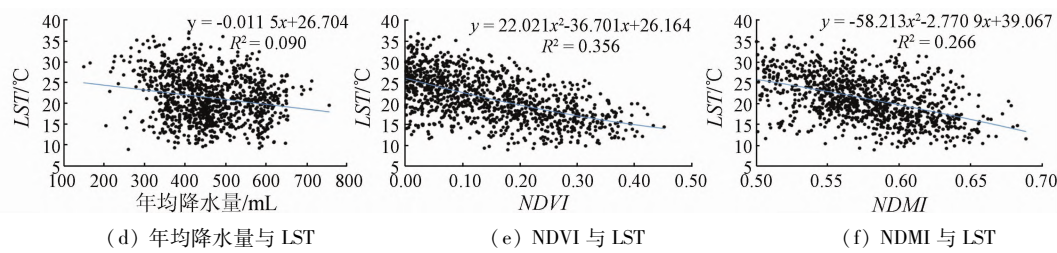


图 3-2 可量化影响因子与 LST 的散点图

Fig. 3-2 Scatter plots of quantifiable influence factors and LST

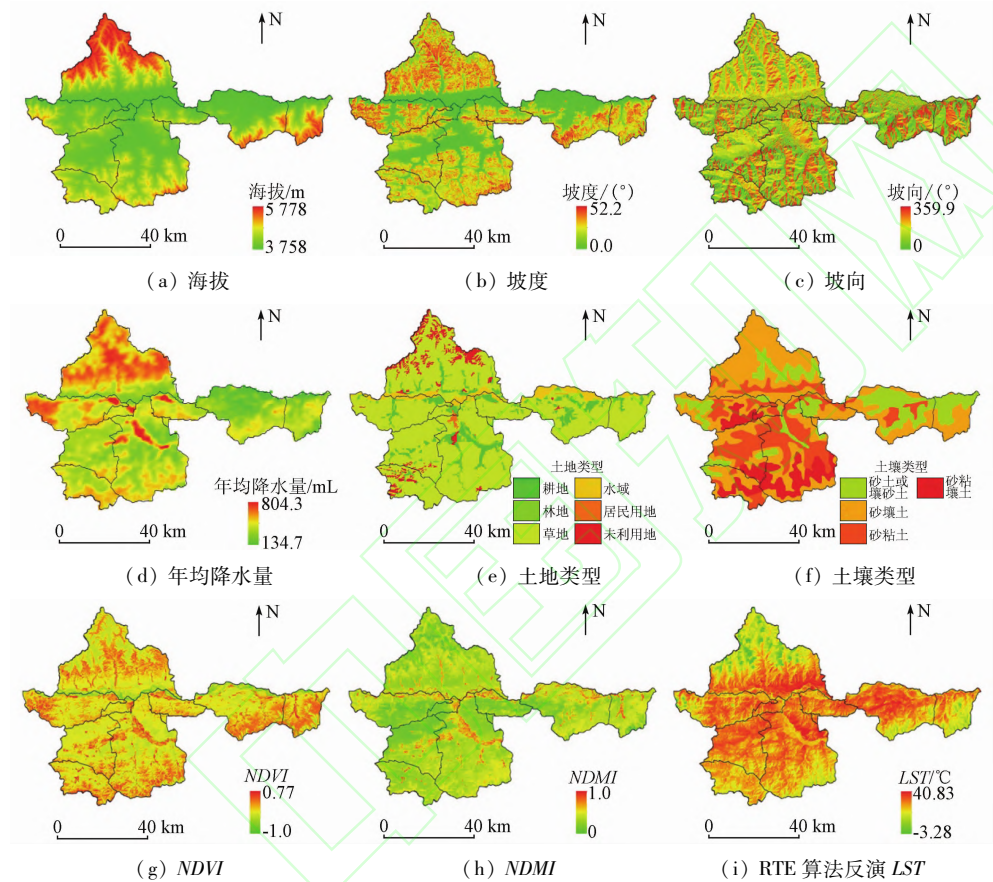


图 4 影响因子与 LST 空间分布

Fig. 4 Influence factors and spatial distribution of LST

从图 3 和图 4 可以看出,各类因子间及各类因子与 LST 间在空间分布上具有明显的差异。在可量化因子与 LST 的最佳拟合关系中,海拔与 LST 间的拟合程度最高, R^2 达到了 0.482; 其后依次为 NDVI、NDMI、坡向和坡度; 而年均降水量的拟合程度则相对较差, R^2 不足 0.1。NDVI 与 NDMI 的最佳拟合为二项式拟合,并且 NDVI 的二次项系数为正值,NDMI 的二次项系数为负值,这与孙常峰等^[8]的结论相一致。在所有可量化因子中,坡向与 LST 间呈现出 LST 随坡向度数的增加先增加后降低的趋势,这与韩贵锋等^[22]所得结论一致。除坡向外,其他因子与 LST 之间均呈明显的负相关关系,在海拔、NDVI、坡度、NDMI 和年均降水量不断增加的情况下,LST 会逐渐降低,但下降速度各有差异。

3.3 LST 的影响因素

3.3.1 因子探测结果与分析

将 1 183 个随机点中的因子重分类结果与 LST 应用因子探测器进行探测,探测结果如表 3 和表 4 所示。

表 3 单影响因子的探测结果

Tab.3 Detection results of single influence factor			
探测因子(X_1)	解释力 P	显著水平 Q	排序(P 值由高到低)
海拔	0.458 6	0.00	1
坡度	0.133 0	0.00	6
坡向	0.244 4	0.00	3
年均降水量	0.063 2	0.00	7
土地类型	0.037 5	0.09	8
土壤类型	0.171 3	0.00	5
NDVI	0.302 4	0.00	2
NDMI	0.196 5	0.00	4

表 4 因子影响 LST 显著性差异统计 (置信水平 95%)

Tab.4 Multiple factors affect statistical significance of LST differences

探测因子(X_1)	1	2	3	4	5	6	7	8
1								
2	N							
3	Y	Y						
4	Y	Y	Y					
5	N	Y	N	N				
6	Y	Y	N	N	Y			
7	N	Y	N	N	N	N		
8	N	N	N	N	N	N	N	

注：1 表示土壤类型；2 表示土地类型；3 表示 NDVI；4 表示海拔；5 表示坡度；6 表示坡向；7 表示 NDMI；8 表示年均降水量。

从表 3 可以看出,其他因子 Q 值均为 0.00,而土地类型的 Q 值为 0.09 (>0.05),说明在高原地区土地类型对 LST 空间分布与分异特征的影响并不显著,不能够作为影响因子。综合分析表 3 和表 4

表 5 多影响因子的交互作用

Tab.5 Interaction of multiple factors

交互因子($X_1 \cap X_2$)	$P(X_1)$	$P(X_1)$	$P(X_1 \cap X_2)$	交互结果	影响模式
土壤类型 $\cap$ 海拔	0.171 3	0.458 6	0.478 1	$P(A \cap B) > \max [P(A), P(B)]$	双线性增强
土壤类型 $\cap$ 坡度	0.171 3	0.133 0	0.239 9	$P(A \cap B) > \max [P(A), P(B)]$	双线性增强
土壤类型 $\cap$ 坡向	0.171 3	0.244 4	0.408 1	$P(A \cap B) > \max [P(A), P(B)]$	双线性增强
土壤类型 $\cap$ 年均降水量	0.171 3	0.063 2	0.233 1	$P(A \cap B) > \max [P(A), P(B)]$	双线性增强
土壤类型 $\cap$ NDVI	0.171 3	0.302 4	0.407 9	$P(A \cap B) > \max [P(A), P(B)]$	双线性增强
土壤类型 $\cap$ NDMI	0.171 3	0.196 5	0.392 1	$P(A \cap B) > P(A) + P(B)$	非线性增强
NDVI $\cap$ 海拔	0.302 4	0.458 6	0.573 9	$P(A \cap B) > \max [P(A), P(B)]$	双线性增强
NDVI $\cap$ 坡度	0.302 4	0.133 0	0.370 4	$P(A \cap B) > \max [P(A), P(B)]$	双线性增强
NDVI $\cap$ 坡向	0.302 4	0.244 4	0.478 2	$P(A \cap B) > \max [P(A), P(B)]$	双线性增强
NDVI $\cap$ 年均降水量	0.302 4	0.063 2	0.341 9	$P(A \cap B) > \max [P(A), P(B)]$	双线性增强
NDVI $\cap$ NDMI	0.302 4	0.196 5	0.342 3	$P(A \cap B) > \max [P(A), P(B)]$	双线性增强
海拔 $\cap$ 坡度	0.458 6	0.133 0	0.482 7	$P(A \cap B) > \max [P(A), P(B)]$	双线性增强
海拔 $\cap$ 坡向	0.458 6	0.244 4	0.710 4	$P(A \cap B) > P(A) + P(B)$	非线性增强
海拔 $\cap$ 年均降水量	0.458 6	0.063 2	0.490 8	$P(A \cap B) > \max [P(A), P(B)]$	双线性增强
海拔 $\cap$ NDMI	0.458 6	0.196 5	0.633 2	$P(A \cap B) > \max [P(A), P(B)]$	双线性增强
坡度 $\cap$ 坡向	0.133 0	0.244 4	0.369 4	$P(A \cap B) > \max [P(A), P(B)]$	双线性增强
坡度 $\cap$ NDMI	0.133 0	0.196 5	0.383 8	$P(A \cap B) > P(A) + P(B)$	非线性增强
坡度 $\cap$ 年均降水量	0.133 0	0.063 2	0.184 1	$P(A \cap B) > \max [P(A), P(B)]$	双线性增强
坡向 $\cap$ NDMI	0.244 4	0.196 5	0.375 0	$P(A \cap B) > \max [P(A), P(B)]$	双线性增强
坡向 $\cap$ 年均降水量	0.244 4	0.063 2	0.336 4	$P(A \cap B) > P(A) + P(B)$	非线性增强
NDMI $\cap$ 年均降水量	0.196 5	0.063 2	0.290 6	$P(A \cap B) > P(A) + P(B)$	非线性增强

从表 5 可以看出,高原地区 LST 的空间分布与分异特征的形成并非只受到一种因子的影响,而是由多种因子共同作用的结果,并且影响效果更为显著。其中,海拔与坡向(交互解释力 $P=0.710\ 4$)的协同作用最为明显,其后依次为海拔与 NDMI(交互解释力 $P=0.633\ 2$)、海拔与 NDVI(交互解释力 $P=0.573\ 9$)。在与海拔的共同作用下,与 NDVI 相比,NDMI 的作用效果更为明显。与单个因子的解释力相比,所有因子在相互交互后对 LST 的空间分布与分异特征的影响均具有协同增强的作用,并且所有因子的影响效果均为非独立存在的。海拔与坡

可以看出,海拔与 NDVI 对 LST 空间分布与分异特征的影响较为显著,解释力较强,是主要影响因子;而坡向、NDMI、土壤类型与坡度的解释力则相对较弱,是次要影响因子。从单因子的角度来看,海拔(解释力 $P=0.458\ 6$)是影响 LST 的空间分布与分异特征最主要因子,这与孙常峰等^[8]得出的结论相一致;其后依次为 NDVI(解释力 $P=0.302\ 4$)、坡向(解释力 $P=0.244\ 4$)、NDMI(解释力 $P=0.196\ 5$)、土壤类型(解释力 $P=0.171\ 3$)与坡度(解释力 $P=0.133\ 0$)。年均降水量对 LST 的空间分布与分异特征的影响程度明显偏弱,解释力不足 0.1。

3.3.2 交互探测结果与分析

为了进一步分析各类因子与 LST 间的关系,将 1 183 个随机点中的因子重分类结果与 LST 应用交互探测器进行探测,探测结果如表 5 所示。

向在相互作用环境下的交互解释力(0.710 4)远远大于单因子作用下的解释力(0.458 6 与 0.244 4)。通过交互探测器的探测结果也可以发现,各影响因子之间的相互作用也并非因子间简单的相乘或相加关系,而是一种相对复杂的叠加关系,这也是地理探测器的优势所在。

4 结论

本文利用 Landsat8 数据,采用 2 种典型的地表温度(LST)反演算法获得了研究区 LST,同时应用

地理探测器模型的因子探测器与交互探测器分别定量探测出单因子与多因子共同作用时对 LST 的影响程度,得到了以下结论:

1)在可量化因子中,除坡向外的其他因子与 LST 间均呈明显的负相关关系,LST 随着 NDVI、海拔、NDMI、坡度以及年均降水量的增加会逐渐降低,但下降速度存在差异;坡向则与 LST 呈现出 LST 随坡向度数的增加先增加后降低的趋势。

2)在单因子作用下,海拔是影响高原地区 LST 空间分布与分异特征的最主要因素,解释力最强,其后依次为 NDVI、坡向、NDMI、土壤类型、坡度与年均降水量。

3)高原地区 LST 的空间分布与分异特征的形成并非只受到一种因子的影响,而是由多因子共同作用的结果。在多因子共同作用下,海拔与坡向、海拔与 NDMI 以及海拔与 NDVI 对 LST 的空间分布与分异特征的影响最为显著,解释力最强。同时,与单因子相比,所有因子在交互作用下对 LST 的空间分布与分异特征的影响均具有协同增强的作用。

参考文献 (References):

[1] Scarano M, Sobrino J A. On the relationship between the sky view factor and the land surface temperature derived by Landsat - 8 images in Bari, Italy [J]. International Journal of Remote Sensing, 2015, 36(19 - 20): 4820 - 4835.

[2] Roşca C F, Harpa G V, Croitoru A E, et al. The impact of climatic and non - climatic factors on land surface temperature in south-western Romania [J]. Theoretical and Applied Climatology, 2016, 130(3 - 4): 1 - 16.

[3] Kerchov R V D, Lhermitte S, Veraverbeke S, et al. Spatio - temporal variability in remotely sensed land surface temperature, and its relationship with physiographic variables in the Russian Altay Mountains [J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2013, 20(2): 4 - 19.

[4] 段金龙, 张学雷. 区域地表水体、归一化植被指数与热环境多样性格局的关联分析 [J]. 应用生态学报, 2012, 23(10): 2812 - 2820.

Duan J L, Zhang X L. Correlative analysis of the diversity patterns of regional surface water, NDVI and thermal environment [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2012, 23(10): 2812 - 2820.

[5] 李润林, 时永杰, 姚艳敏, 等. 基于 Landsat TM/ETM + 的张掖市甘州区绿洲冷岛效应时空变化研究 [J]. 干旱区资源与环境, 2014, 28(9): 139 - 144.

Li R L, Shi Y J, Yao Y M, et al. Temporal and spatial variation of oasis cold island effect in Ganzhou District of Zhangye based on Landsat TM / ETM + [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2014, 28(9): 139 - 144.

[6] 钱乐祥, 崔海山. 归一化水汽指数与地表温度的关系 [J]. 地理研究, 2008, 27(6): 1358 - 1366.

Qian L X, Cui H S. Relationship between normalized difference moisture index and land surface temperature [J]. Geographical Re-

search, 2008, 27(6): 1358 - 1366.

[7] 文路军, 彭文甫, 杨华容, 等. 夏季川西高原地表温度的空间特征和影响因素——以西昌市大部分区域为例 [J]. 国土资源遥感, 2017, 29(2): 207 - 214. doi:10. 6046/gtzyyg. 2017. 02. 30.

Wen L J, Peng W F, Yang H R, et al. An analysis of land surface temperature (LST) and its influencing factors in summer in western Sichuan Plateau: A case study of Xichang City [J]. Remote Sensing for Land and Resources, 2017, 29(2): 207 - 214. doi:10. 6046/gtzyyg. 2017. 02. 30.

[8] 孙常峰, 孔繁花, 尹海伟, 等. 山区夏季地表温度的影响因素——以泰山为例 [J]. 生态学报, 2014, 34(12): 3396 - 3404.

Sun C F, Kong F H, Yin H W, et al. Analysis of factors affecting mountainous land surface temperature in the summer: A case study over Mount Tai [J]. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(12): 3396 - 3404.

[9] 张勇, 余涛, 顾行发, 等. CBERS - 02 IRMSS 热红外数据地表温度反演及其在城市热岛效应定量分析中的应用 [J]. 遥感学报, 2006, 10(5): 789 - 797.

Zhang Y, Yu T, Gu X F, et al. Land surface temperature retrieval from CBERS - 02 IRMSS thermal infrared data and its applications in quantitative analysis of urban heat island effect [J]. Journal of Remote Sensing, 2006, 10(5): 789 - 797.

[10] Jiménez - Muñoz J C, Sobrino J A. A generalized single - channel method for retrieving land surface temperature from remote sensing data [J]. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 2003, 108(d22): 4688 - 4695.

[11] Jiménez - Muñoz J C, Sobrino J A, Skoković D, et al. Land surface temperature retrieval methods from Landsat - 8 thermal infrared sensor data [J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2014, 11(10): 1840 - 1843.

[12] 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.

Wang J F, Xu C D. Geodetector: Principle and prospective [J]. Acta Geographica Sinica, 2017, 72(1): 116 - 134.

[13] Wang J F, Hu Y. Environmental health risk detection with Geodetector [J]. Environmental Modelling and Software, 2012, 33: 114 - 115.

[14] 熊俊楠, 赵云亮, 程维明, 等. 四川省山洪灾害时空分布规律及其影响因素研究 [J]. 地球信息科学学报, 2018, 20(10): 1443 - 1456.

Xiong J N, Zhao Y L, Cheng W M, et al. Temporal - spatial distribution and the influencing factors of mountain flood disasters in Sichuan Province [J]. Journal of Geo - Information Science, 2018, 20(10): 1443 - 1456.

[15] 徐秋蓉, 郑新奇. 一种基于地理探测器的城镇扩展影响机理分析法 [J]. 测绘学报, 2015, 44(s1): 96 - 101.

Xu Q R, Zheng X Q. Analysis of influencing mechanism of urban growth using geographical detector [J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2015, 44(s1): 96 - 101.

[16] 李华威, 万庆. 小流域山洪灾害危险性分析之降雨指标选取的初步研究 [J]. 地球信息科学学报, 2017, 19(3): 425 - 435.

Li H W, Wan Q. Study on rainfall index selection for hazard analysis of mountain torrents disaster of small watersheds [J]. Journal of Geo - Information Science, 2017, 19(3): 425 - 435.

[17] 马伟, 赵珍梅, 刘翔, 等. 植被指数与地表温度定量关系遥感

分析——以北京市 TM 数据为例[J]. 国土资源遥感,2010,22(4):108-112. doi:10.6046/gtzyyg. 2010. 04. 22.

Ma W,Zhao Z M,Liu X,et al. A quantitative analysis of the relationship between vegetation indices and land surface temperature based on remote sensing:A case study of TM data for Beijing[J]. Remote Sensing for Land and Resources,2010,22(4):108-112. doi:10.6046/gtzyyg. 2010. 04. 22.

[18] 杜培军,陈 宇,谭 琨. 江苏滨海湿地土地利用/覆盖变化与地表温度响应遥感监测[J]. 国土资源遥感,2014,26(2):112-120. doi:10.6046/gtzyyg. 2014. 02. 22.

Du P J,Chen Y,Tan K. The remote sensing monitoring of land use/cover change and land surface temperature responses over the coastal wetland in Jiangsu[J]. Remote Sensing for Land and Resources,2014,26(2):112-120. doi:10.6046/gtzyyg. 2014. 02. 22.

[19] 姚宜斌,雷祥旭,张 良,等. 青藏高原地区 1979—2014 年大气可降水量和地表温度时空变化特征分析[J]. 科学通报,2016,61(13):1462-1477.

Yao Y B,Lei X X,Zhang L,et al. Analysis of precipitable water vapor and surface temperature variation over Qinghai-Tibetan Plateau from 1979 to 2014[J]. Chinese Science Bulletin,2016,61(13):1462-1477.

[20] 李 斌,王慧敏,秦明周,等. NDVI、NDMI 与地表温度关系的对比研究[J]. 地理科学进展,2017,36(5):585-596.

Li B,Wang H M,Qin M Z,et al. Comparative study on the correlations between NDVI,NDMI and LST[J]. Progress in Geography, 2017,36(5):585-596.

[21] 刘彦随,李进涛. 中国县域农村贫困化分异机制的地理探测与优化决策[J]. 地理学报,2017,72(1):161-173.

Liu Y S,Li J T. Geographic detection and optimizing decision of the differentiation mechanism of rural poverty in China[J]. Acta Geographica Sinica,2017,72(1):161-173.

[22] 韩贵锋,叶 林,孙忠伟. 山地城市坡向对地表温度的影响——以重庆市主城区为例[J]. 生态学报,2014,34(14):4017-4024.

Han G F,Ye L,Sun Z W. Influence of aspect on land surface temperature in mountainous city: A case study in central area of Chongqing City[J]. Acta Ecologica Sinica,2014,34(14):4017-4024.

Spatial variability and influencing factors of LST in plateau area: Exemplified by Sangzhuzi District

XIONG Junnan^{1,2}, LI Wei¹, CHENG Weiming², FAN Chunkun³, LI Jin¹, ZHAO Yunliang¹

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China; 2. State Key Laboratory of Resources and Environmental Information System, Institute of Geographic and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; 3. Agriculture Research Institute, Tibet Academy of Agriculture and Animal Husbandry Sciences, Lhasa 850000, China)

Abstract: Revealing the spatial differentiation characteristics and influencing factors of land surface temperature (LST) in the plateau area is of great significance for the study of local climate change. However, the existing research merely analyzes the relationship between single factor and LST, whereas the study of the spatial differentiation characteristics and the quantitative analysis of influencing factors of LST in the plateau area are relatively insufficient. Taking the Sangzhuzi District of Xigaze City as an example, the authors used Landsat8 remote sensing data to invert the LST of the study area by using radiative transfer equation algorithm and the universal single-channel algorithm. In addition, the factor detector and interaction detector in the geodetector model were used to quantitatively detect the influence of single factor and multiple factors on LST, respectively. The results show that, in the quantifiable factors, LST increases first and then decreases with the increase in the degree of aspect, and there is a significant negative correlation between LST and other factors with a difference in the descent speed. Elevation is the most important factor affecting the spatial distribution and forming the differentiation characteristics of LST in the plateau area, followed by normalized difference vegetation index (NDVI), aspect, normalized difference moisture index (NDMI), soil type, slope, and average annual precipitation; the spatial distribution and the formation of differentiation characteristics of LST in the plateau area are the result of multiple factors, all of which have a synergistic enhancement effect under interactions, such as the interaction of elevation and aspect, elevation and NDMI, and elevation and NDVI with the most significant impact.

Keywords: Landsat8; plateau region; land surface temperature(LST); influence factors; geographical detector (责任编辑: 张 仙)