

doi: 10.7522/j.issn.1000-0240.2013.0007

Wei Wei, Shi Peiji, Yang Wangming, *et al.* Spatial distribution of land surface temperature in Shiyang River basin based on MODIS data [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2013, 35(1): 57–64. [魏伟, 石培基, 杨旺明, 等. 基于 MODIS 数据的石羊河流域地表温度空间格局[J]. 冰川冻土, 2013, 35(1): 57–64.]

基于 MODIS 数据的石羊河流域地表温度空间格局

魏 伟¹, 石培基¹, 杨旺明¹, 王旭峰², 王雪平³

(1. 西北师范大学 地理与环境科学学院, 甘肃 兰州 730070; 2. 中国科学院 寒区旱区环境与工程研究所, 甘肃 兰州 730000; 3. 兰州理工大学 土木工程学院, 甘肃 兰州 730050)

摘 要: 利用 2010 年 4 期 MODIS 影像, 基于植被指数、地表比辐射率、大气透过率和星上亮度温度, 采用分裂窗口算法, 反演石羊河流域不同季节地表温度并对其进行验证。结果表明: 石羊河流域四季地表温度变化明显, 昼夜温差很大, 其中, 春季温度分布在 $-13.45 \sim 29.27$ $^{\circ}\text{C}$ 之间; 夏季温度分布在 $-3.75 \sim 56.29$ $^{\circ}\text{C}$ 之间; 秋季温度分布在 $-10.15 \sim 32.67$ $^{\circ}\text{C}$ 之间; 冬季温度分布在 $-17.15 \sim 12.75$ $^{\circ}\text{C}$ 之间。从地表温度空间分布上看, 在武威、民勤、古浪等绿洲地区地表热量丰富, 水土和植被效应显著, 热量呈圈状空间递减趋势; 在下游地区腾格里沙漠和巴丹吉林沙漠地区夏季温度最高, 祁连山东端的石羊河上游地区由于受常年积雪、河流、地表植被和海拔等因素影响地表温度较低。MODIS 数据为宏观小流域热环境监测提供了新的途径, 且将遥感数据和地表下垫面数据相结合能提高反演精度。

关键词: 小流域热环境; 地表温度反演; 分裂窗口算法; MODIS; 石羊河流域

中图分类号: P407 **文献标识码:** A

0 引言

地表温度 (Land Surface Temperature, LST) 是地球资源监测和地表生态环境系统研究的重要指标, 也是区域和全球尺度地表物理过程的一个关键因子, 可以反映土壤-植被-大气系统的能量流动与物质交换。因此, 地表温度在气候学、水文学、生态学、生物化学的研究中具有重要的意义^[1], 并且在农业气象及地表能量通量、热惯量计算等方面有重要的应用价值, 特别是近些年发展起来的一些农业干旱遥感监测模型需要考虑地表温度参数^[2-4]。随着遥感技术的快速发展, 许多学者利用热红外遥感影像反演大面积、甚至全球的地温资料, 并且取得了一些成果^[5-8]。目前为止, 国内外已经发展了很多实用的理论方法, 如热辐射传输方程法、单窗算法、分裂窗算法和多波段算法, 其中发展得较为完善的就是分裂窗算法。1984 年 Price^[9] 利用大气辐射传输理论, 对大气的影响作简化处理后提出了

分裂窗算法, 给出了具体的分裂窗算法。后来 Becker 等^[10]、Sobrino 等^[11] 和 Coll 等^[12] 在 Price 的基础上作了进一步研究, 在 LST 计算公式中加入水汽含量、观测角度、地面比辐射率等因子, 使得结果更加准确。MODIS 作为新一代对地观测仪, 具有从可见光到远红外 36 个波段, 其中 31、32 波段和 NOAA/AVHRR 的 4、5 波段非常接近, 并且数据精度更高。因此, 上述应用于 AVHRR 数据的分裂窗方法完全可以应用到 MODIS 数据上^[13]。

由于石羊河流域面积大, 生态环境较为脆弱, 流域内农业生产的空间布局和生态规划, 都需考虑地表温度及热环境变化, 因此, 采用 MODIS 遥感数据计算地表温度参数, 对适时播种、作物长势变化分析等农业生产活动具有重要的指导意义。装载于 EOS 上午星 (Terra) 和下午星 (Aqua) 上的中分辨率成像光谱仪 (MODIS) 有 36 个光谱波段, 29~36 波段为热红外波段, 其中有 6 个热红外波段 (20, 21, 22, 23, 31, 32) 可用于分析地表热辐射和地表

收稿日期: 2012-09-08; 修订日期: 2012-12-22

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41261104); 国家社科基金青年项目 (12CTJ001); 甘肃省青年科技基金计划项目 (1107RJYA077) 资助

作者简介: 魏伟 (1982—), 男, 甘肃庄浪人, 讲师, 2009 年毕业于西北师范大学, 现主要从事 GIS 和 RS 的应用研究。

E-mail: weiweigis2006@126.com

温度的变化。

1 研究区概况

石羊河流域位于甘肃省河西走廊东部,祁连山北麓,介于 $101^{\circ}22' \sim 104^{\circ}16' E$, $36^{\circ}29' \sim 39^{\circ}27' N$ 之间,属河西走廊三大内陆河流域之一。流域行政区划包括武威市的凉州区、古浪县、民勤县全部及天祝县部分地区,金昌市的永昌县,金川区全部及张掖市肃南裕固族自治县,共 3 市 7 县(区),总面积约 $41\,600\text{ km}^2$,总人口约 240.81×10^4 人。该流域地势南高北低,自西南向东北倾斜,且深居大陆腹地,属大陆性温带干旱气候。研究区太阳辐射强,日照充足,夏季短而炎热,冬季长而寒冷,温差大,降水少,蒸发强烈,空气干燥。流域上游年均气温低于 6°C ,降雨量 $400 \sim 600\text{ mm}$,中游年均气温低于 $6 \sim 8^{\circ}\text{C}$,降雨量 $150 \sim 250\text{ mm}$,下游年均气温高于 8°C ,降雨量不足 150 mm 。流域内土壤、植被类型分布因受气候、水文和地形等自然条件的影响,形成了明显的土壤-植被垂直带谱。

2 研究资料及方法

2.1 数据资料及预处理

MODIS 数据来源于 NASA 网站,美国国家航空航天局为 MODIS 建立的网站服务器和数据网络服务器提供数据支持。鉴于 MODIS 的时间和空间分辨率特点,选择 2010 年 1、4、7、10 月的 EOS/MODIS1B 数据,影像无云或云较少条件下成像,影像质量较好。在基于 31、32 波段分裂窗算法的地表温度遥感反演处理结果的基础上,对各月资料进行加和平均法合成,分别代表石羊河流域的冬季、春季、夏季、秋季的 4 个季节,来研究干旱内陆河流域的季节变化特征。以 MODIS 资料研究日间和夜晚石羊河流域的日变化特征,反演石羊河流域地表参数,要尽可能地保留原数据,以便较好地反映冰雪、沙漠和绿洲及过渡地带动态演变过程及其相互作用。为研究石羊河流域不同下垫面地表温度变化情况,利用土地利用/土地覆盖数据提取研究区具有代表性的下垫面类型,研究区下垫面类型由 TM 遥感影像(获取时间:2010 年 8 月)解译得到,并通过精度检验。下垫面类型主要包括耕地、林地(包括城市或区域绿地)、草地、水体、建设用地(城乡及居民点)、其他用地(主要包括裸地和沙地)等 6 种类型(图 1)。

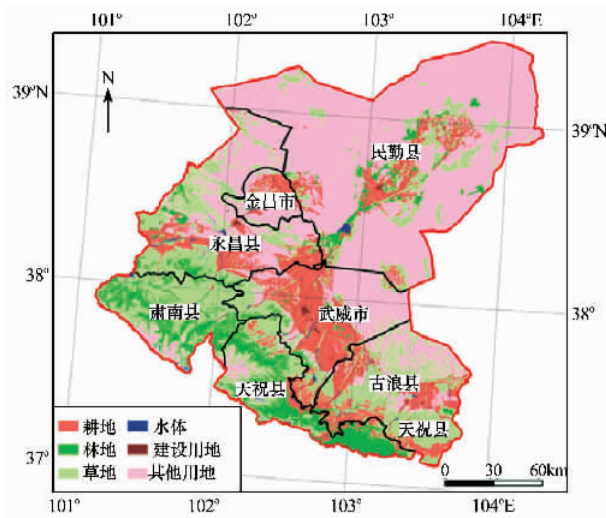


图 1 研究区土地利用

Fig. 1 The land use types in the study area

2.2 研究方法

2.2.1 亮度温度

MODIS 图像是表示图像灰度值的 DN 值来表示。因此,要计算星上亮温,必须先将 DN 值转换成相应的辐射强度值,然后再用普朗克(Planck)函数求解星上亮温,根据 Planck 公式计算 MODIS 第 31 和 32 波段的亮度温度 T_{31} 和 T_{32} 。Planck 公式如下:

$$T_i = \frac{c_2}{\lambda_i \ln(1 + \frac{c_1}{\lambda_i^5 R_i})} \quad (1)$$

式中: T_i 为第 i 波段的亮度温度; λ_i 为第 i 波段的中心波长,对 MODIS 第 31 和第 32 波段,分别取 $\lambda_{31} = 11.03\text{ }\mu\text{m}$, $\lambda_{32} = 12.02\text{ }\mu\text{m}$; c_1 和 c_2 分别为第一、第二光谱常量,分别取 $c_1 = 1.19104356 \times 10^{-16}\text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 和 $c_2 = 1.4387685 \times 10^4\text{ }\mu\text{m} \cdot \text{K}$; R_i 为地表在特定波长入的热辐射强度,根据下式计算:

$$R_i = \text{radiance_scale} \cdot (DN - \text{radiance_offset}) \quad (2)$$

式中: radiance_offset 为截距; radiance_scale 为斜率,均可以从 HDF 格式的 MODIS 图像的头文件中直接查出; DN 为 MODIS 影像第 31 和 32 波段的实际保存数值。为便于计算,取 $K_1 = c_1/\lambda_i^5$, $K_2 = c_2/\lambda_i$, 则式(1)转化为:

$$T_i = K_2 / \ln(1 + K_1/R_i) \quad (3)$$

式中:对于 MODIS 第 31 波段,分别为 $K_1 = 729.541636\text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \mu\text{m}^{-1}$, $K_2 = 1304.413871\text{ K}$;对于第 32 波段,分别为 $K_1 = 474.68478\text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \mu\text{m}^{-1}$, $K_2 =$

1196.978785 K.

2.2.2 大气透过率

大气透过率 ϵ 是传感器接受的热辐射能与地表真实辐射值之间的比值. MODIS 的第 2 波段 (0.841~0.876 μm) 和第 5 波段 (1.23~1.25 μm) 是水汽窗口波段, 其透过率接近为 1. 而第 17 波段 (0.89~0.92 μm)、18 波段 (0.931~0.942 μm) 及 19 波段 (0.915~0.925 μm) 是水汽强烈吸收波段. 因此, 利用 MODIS 的水汽吸收波段和大气窗反射率比值来计算大气透过率 ϵ . 本文根据 MODIS 传感器的第 2 和第 19 波段的反射率比值计算 MODIS 的第 19 波段的大气透过率 ϵ_{19} .

$$\epsilon_{19} = R_{19}/R_2 \quad (4)$$

式中: R_2 、 R_{19} 分别为 MODIS 传感器的第 2、19 通道的反照率. 根据 Kaufman^[14] 提出的经验公式计算大气含水量:

$$w = ((0.02 - \ln \epsilon_{19})/0.651)^2 \quad (5)$$

$$w = \left(\frac{\alpha - \ln \epsilon_{19}}{\beta} \right)^2 \quad (6)$$

式中: w 为大气含水量; α 和 β 值为 0.02 和 0.651, 均为经验常数. 最后, 采用 Mao 等^[15-16] 给予大气模拟软件 LOWTRAN 模拟的得到的经验公式, 分别计算第 31 波段和第 32 波段的大气透过率:

$$\tau_{31} = -0.10671w + 1.04015 \quad (7)$$

$$\tau_{32} = -0.12577w + 0.99229 \quad (8)$$

2.2.3 植被指数和植被覆盖率

研究表明, NDVI 是表征植被覆盖状况和陆地辐射温度很好的指标. EOS/MODIS 的 NDVI 通常使用可见光通道 (0.62~0.67 μm), 近红外通道 (0.841~0.876 μm) 反射组合计算. 对于 MODIS 图像而言, NDVI 可用第 1 和 2 波段来计算:

$$\text{NDVI} = (\text{ref}_2 - \text{ref}_1)/(\text{ref}_2 + \text{ref}_1) \quad (9)$$

式中: ref_1 和 ref_2 分别为 MODIS 图像第 1 和 2 波段的反射率. 其中, ref_1 为可见光波段的反射率, ref_2 为近红外波段的反射率. 植被覆盖率的求解公式如下:

$$P_v = (\text{NDVI} - \text{NDVI}_s)/(\text{NDVI}_v + \text{NDVI}_s) \quad (10)$$

式中: P_v 为植被覆盖率; NDVI 是归一化植被指数; NDVI_v 和 NDVI_s 分别为茂密植被覆盖和完全裸土像元的 NDVI 值, 通常取 $\text{NDVI}_v = 0.9$, $\text{NDVI}_s = 0.15$ ^[17]. 本研究根据 MODIS 图像估算植被指数的数值: 首先, 根据 MODIS 平衡遥感图像生成全区的 NDVI 图, 计算 NDVI 值; 然后利用土地利用图和

土壤图对 NDVI 图进行切割, 分别提取累积表, 土壤单元内取频率为 5% 的 NDVI 值为完全裸土像元的 NDVI 值即 NDVI_s , 土地利用单元内取频率为 95% 的 NDVI 值为全植被覆盖像元的 NDVI 值即 NDVI_v . 通过计算获得石羊河流域 $\text{NDVI}_v = 0.5$, $\text{NDVI}_s = 0.04$.

2.2.4 地表比辐射

不同区域的地表结构虽然很复杂, 但从 MODIS 像元的尺度来看, 可以大体视作由不同比例的水体、植被和裸土 3 种地表类型组成的混合像元, 混合像元的平均比辐射率可以用地表构成比例进行估计. 本文采用覃志豪等^[18] 给出的混合像元比辐射率计算公式:

$$\epsilon_i = P_v R_v \epsilon_{iv} + (1 - P_v) R_s \epsilon_{is} + d\epsilon \quad (11)$$

式中: ϵ_i 为 MODIS 图像第 i ($i=31, 32$) 波段的地表比辐射率. 其中, ϵ_{iv} 和 ϵ_{is} 分别为植被和裸土在第 i 波段的地表比辐射率, 分别取 $\epsilon_{31v} = 0.98672$, $\epsilon_{31s} = 0.96767$, $\epsilon_{32v} = 0.98990$, $\epsilon_{32s} = 0.97790$; P_v 为像元的植被覆盖率, 通过植被指数估计; R_v 和 R_s 分别为植被和裸土的辐射比率, 可取 $R_v = 0.92762 + 0.07033P_v$, $R_s = 0.99782 + 0.08362P_v$; $d\epsilon$ 为热辐射相互作用校正, 由植被和裸土之间的热辐射相互作用产生. 值得指出的是, 用式 (11) 计算出的 ϵ_i , 当 $\epsilon_i > \epsilon_{iv}$ 时, 则取 $\epsilon_i = \epsilon_{iv}$; $\epsilon_i < \epsilon_{is}$ 时, 则取 $\epsilon_i = \epsilon_{is}$. 对于水体像元, 直接取水体的地表比辐射率作为该像元的地表比辐射率: $\epsilon_{31} = \epsilon_{32w} = 0.99683$, $\epsilon_{32} = \epsilon_{32w} = 0.99254$. 对于陆地像元, 根据植被覆盖率以及估计该陆地像元的热辐射相互作用校正项 $d\epsilon$. 进而用公式 (11) 估计地表比辐射率 ϵ_{31} 和 ϵ_{32} .

2.2.5 分裂窗算法

用 Qin 等^[19] 提出的两因素模型, 根据亮温的线性组合来反演地表温度, 其计算公式如下^[18]:

$$T_s = A_0 + A_1 T_{31} - A_2 T_{32} \quad (12)$$

式中: T_s 为地表温度 (K), T_{31} 和 T_{32} 分别是 MODIS 第 31 和第 32 波段的亮度温度; A_0 、 A_1 、 A_2 为分裂窗算法的参数, 分别定义如下:

$$A_0 = -64.60363E_1 + 68.72575E_2 \quad (13)$$

$$A_1 = 1 + A + 0.440817E_1 \quad (14)$$

$$A_2 = A + 0.473753E_2 \quad (15)$$

$$A = D_{31}/(D_{32}C_{31} - D_{31}C_{32}) \quad (16)$$

$$E_1 = D_{32}(1 - C_{31} - D_{31})/(D_{32}C_{31} - D_{31}C_{32}) \quad (17)$$

$$E_2 = D_{31}(1 - C_{32} - D_{32})/(D_{32}C_{31} - D_{31}C_{32}) \quad (18)$$

$$D_{31} = (1 - \epsilon_{31})(1 + (1 - \epsilon_{31})\tau_{31}) \quad (19)$$

$$D_{32} = (1 - \epsilon_{32})(1 + (1 - \epsilon_{32})\tau_{32}) \quad (20)$$

$$C_{31} = \epsilon_{31}\tau_{31} \quad (21)$$

$$C_{32} = \epsilon_{32}\tau_{32} \quad (22)$$

上述计算过程中, 最终的参数包括大气透过率参数、地表比辐射率和 MODIS 影像的第 31 和 32 波段的亮度温度。对大气透过率和地表比辐射的估计的精度直接影响到反演地表温度的精度。

3 结果分析

3.1 下垫面类型与地表温度的关系

下垫面类型与地表温度密切相关(图 2)。总体而言, 白天, 耕地、林地、水体、建设用地的地表温度依次升高; 黑夜, 林地、耕地、建设用地、水体温度依次增加。白天, 建设用地升温最快, 对应的地表温度高; 晚上, 水体温度降温最慢, 水体温度最高; 林地由于植被生理活动的作用, 对热量有较好的吸收, 因此, 它的温度往往最低。然而, 在不同的季节, 区分白天和黑夜, 地表温度变化的趋势、幅度都有不同的差异, 如: 在冬季白天, 水体的温度最高, 为 13.3 °C; 而沙地寒漠等其他用地的温度最低, 为 7.6 °C。夏季白天正好相反, 其他用地温度最高, 地表温度甚至达到了 45.8 °C, 而水体相对较低, 为 36 °C。冬季夜间温度最低的为其他用地, 达到了 -20 °C, 最高的为水体, 温度为 -6.4 °C。夏季夜间林地温度最低, 为 17 °C, 而水体相对较高, 为 22 °C。这种变化趋势, 与不同下垫面类型的热容量性质具有密切的关系。

通过研究发现, 植被高低及茂密程度对所在地表温度影响很大。在夜间, 由于植被覆盖增大导致的地表温度降低比在白天更为明显, 春秋两季比冬夏两季的变化更为明显。这种随季节及时间变动的变化趋势需要对植被生长周期进行监测才有可能得到进一步解释。

3.2 石羊河流域地表温度空间分布特征

从反演的地表温度来看(图 3), 可以分成 3 个

大的温度区: 1) 以天祝、肃南和永昌大部为主的祁连山区。该区海拔在 3 000~5 200 m 之间, 由于受海拔高、气温低、永久性积雪和寒漠广布共同影响, 地表温度普遍较低, 除夏季外, 其余季节地表温度均在 0 °C 以下; 2) 以武威、古浪和金昌为主要分布区的绿洲区。该区海拔 1 400~2 200 m 之间, 地形从高山到盆地平原均有分布, 是较为主要的城镇和居民点分布区之一, 主要有耕地、草地、戈壁和裸岩分布。其中, 耕地和草地为主要土地类型, 土地和植被退化度低, 植被相对较好, 而且地势平坦, 光热资源充足, 地表温度较高, 为石羊河的精华之地, 年平均地表温度为 15~25 °C; 3) 以民勤为主的沙漠裸岩区。该区由于沙地、裸岩大面积分布, 其中民勤东部的裸岩分布地区, 在不同季节白天和夜间其地表温度差异很大, 加之其海拔只有 1 200 m, 因此受综合因素影响, 其最大温度达到了 32 °C。为了更直观地理解流域地表温度的地域分布, 分别统计了上游、中游和下游平均温度, 发现上游和中游平均温度相差 19.4 °C, 上游和下游平均温度相差 25.8 °C。之所以如此悬殊, 主要是因为海拔和地形因素的影响, 石羊河流域海拔从下游 1 200 m 到上游的 5 200 m, 海拔相差 4 000 m, 加之地表覆盖迥异。通过分析比较发现, 上游祁连山水源地, 除了积雪常年覆盖这一因素之外, 海拔相对高, 气候湿润, 植被繁茂, 因水分蒸腾作用降低叶的温度等综合因素, 导致其温度很低; 下游的民勤北部, 夏天非常炎热, 温度地表温度达到 56 °C 左右, 冬季则非常寒冷, 温度降至 -8.5 °C。主要由于下游地区沙漠和裸岩广布, 这种干燥地表容易吸收太阳辐射, 升温很快; 而中游地区位于平原地区, 海拔和纬度适中, 夏季温度主要分布区间在 13~38 °C 之间, 冬季地表温度分布在 -19~4 °C 之间。由于受农作物和植被等的影响, 这里地热资源相对丰富, 常年温度较高, 为发展绿洲农业提供了有利条件。石羊河流域不同月份地表温度分布情况如图 4 所示。

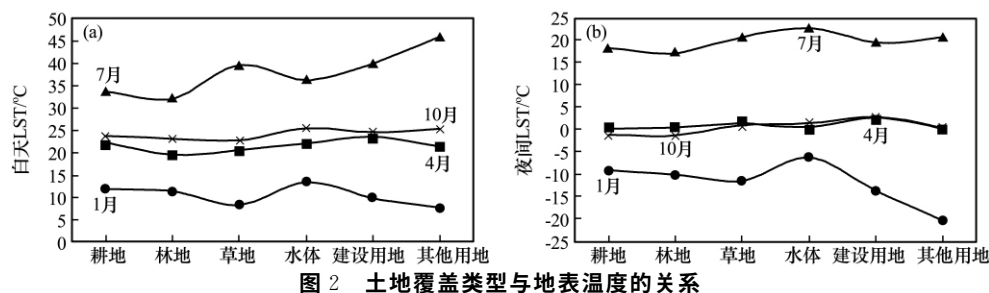


图 2 土地覆盖类型与地表温度的关系

Fig. 2 The land surface temperatures of different cover types, daytime and night

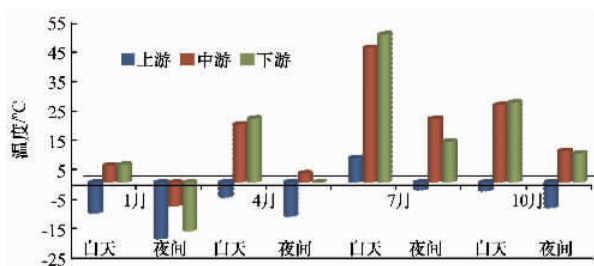


图 3 不同区域地表温度分布

Fig. 3 The monthly mean land surface temperatures in Jan., April, July and Oct., daytime and night

3.3 石羊河流域地表温度时间分布特征

从地表温度分布季节来看(表 1), 石羊河流域四季温度变化明显, 昼夜温差很大. 其中, 春季温度分布在 $-13.45 \sim 29.27^{\circ}\text{C}$ 之间; 夏季温度分布在 $-3.75 \sim 56.29^{\circ}\text{C}$ 之间; 秋季温度分布在 $-10.15 \sim 32.67^{\circ}\text{C}$ 之间; 冬季温度分布在 $-17.15 \sim 12.75^{\circ}\text{C}$

之间. 1 月和 10 月温度差异最大, 1 月份白天温差达到 23.8°C , 夜间温差达到 18.7°C ; 10 月份白天温差达到 35.7°C , 夜间温差达到 32.7°C . 从各月份均值来看, 无论白天还是夜间 1 月份均值最小, 昼夜温差达到 17.83°C ; 而 7 月份温度最高, 昼夜温差为 27.5°C . 通过对石羊河流域地表温度的分布特征进行分析发现, 其表现出的流域内部城镇热岛效应并不明显, 由于研究区是一个由绿洲-荒漠生态系统构成的干旱内陆河流域, 特殊的地理环境造就其景观的多样化, 使得地表热量在冬夏两季变化明显, 同一季节在昼夜变化显著, 1 月份与 7 月份白天温差达到 28.9°C , 夜间温差达到 19.2°C . 通过分析发现, 石羊河流域中游地区多为绿地, 植被生长相对较好, 由于中游地处绿洲区, 同时也是城镇的分布区, 但由于绿洲效应显著于城市热岛效

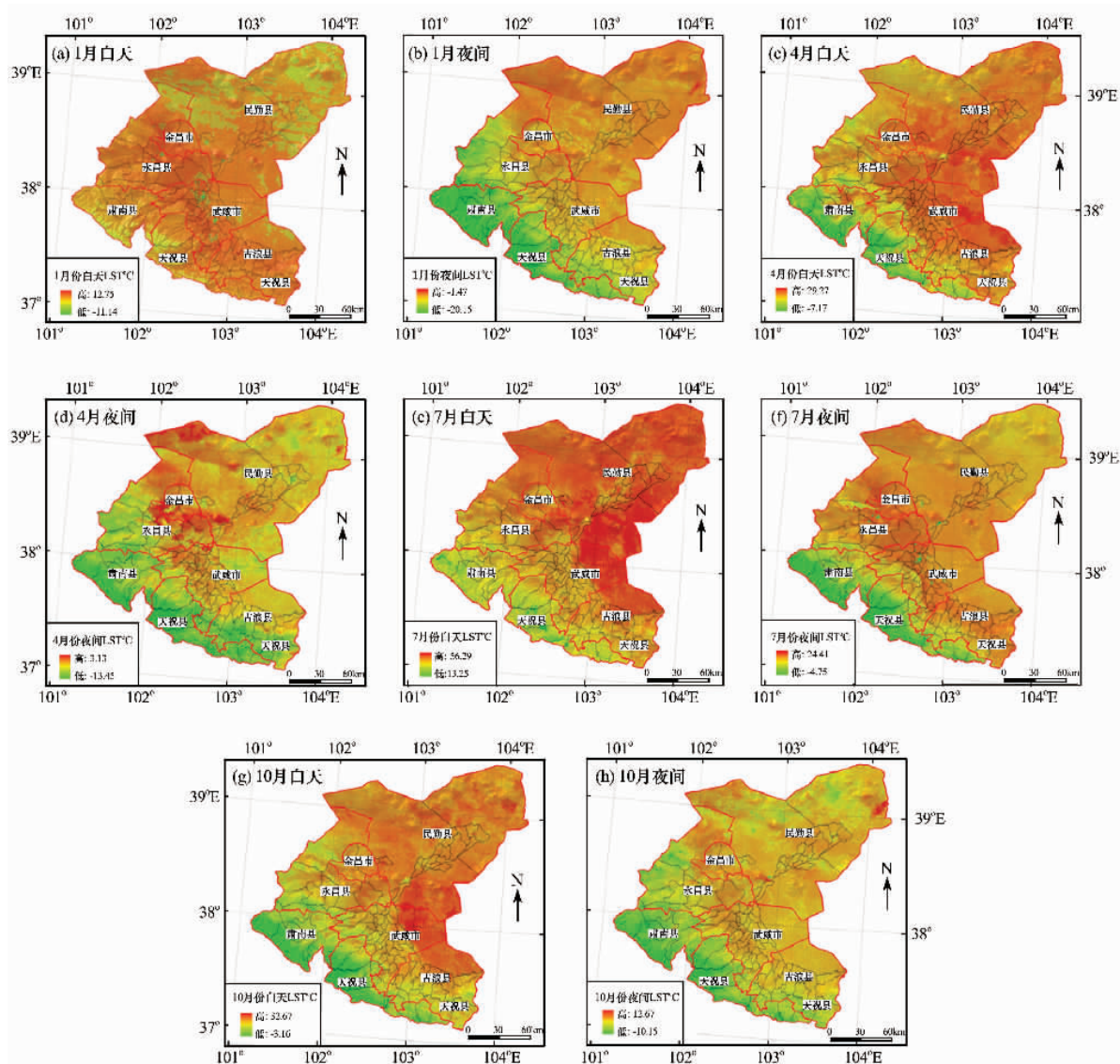


图 4 研究区 1、4、7、10 月地表温度分布图

Fig. 4 The spatial distribution of land surface temperatures in Jan., April, July and Oct., daytime and night

应,使得该区昼夜温差与其他地区相比较小.而其他地区较多为戈壁、荒漠,由于沙质地表比热较小,因此日落后净辐射值转为负值,温度降低较快.山区由于海拔高,受地形因素受纬度的影响,夜间热量损失要比盆地快,因而上、下游温度较低,且昼夜温差也较大.

3.4 石羊河流域不同地域地表温度分布特征

为进一步研究石羊河流域地表温度空间分布情况,从上游祁连山到下游民勤北部做地表温度不同月份和昼夜变化的剖面线(图5),可大致看出地表温度呈水平“S”状分布.其中,在1月份,白天和夜间都表现出农业绿洲区呈现“隆起”状态,由于在卫

表1 不同季节热岛指数的统计特征

Table 1 The monthly mean heat island indexes in Jan., April, July and Oct., daytime and night

	1月		4月		7月		10月	
	白天	夜间	白天	夜间	白天	夜间	白天	夜间
最大值/°C	12.75	-1.47	29.27	3.13	56.29	24.41	32.67	12.67
最小值/°C	-11.14	-20.15	-7.17	-13.45	13.25	-4.75	-3.16	-10.15
均值/°C	5.64	-12.19	8.02	0.78	42.1	14.6	19.14	-1.55

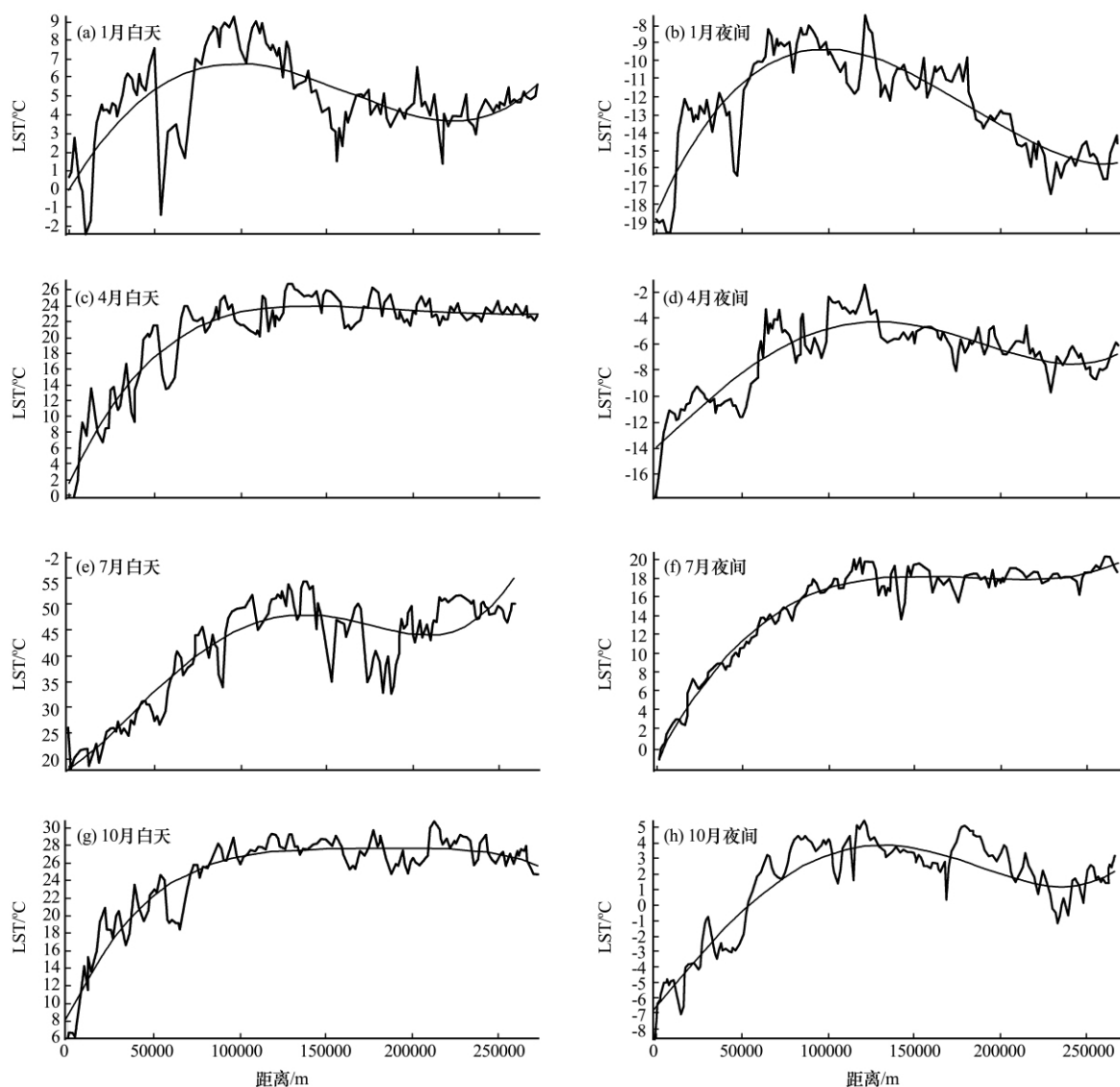


图5 研究区地表温度 SW-NE 剖面曲线

Fig. 5 Typical land surface temperatures changing from upper to lower reaches along the SW-NE direction in Jan., April, July and Oct., daytime and night

星过境时刻上游和下游地区吸收太阳热量时间较短, 而植被和绿洲散热较慢, 导致中游温度高于上、下游; 而在 7 月份, 白天温度很高, 裸岩和沙漠广布的下游地区吸热很快, 而中游绿洲区吸热相对较慢, 因此剖面图上表现为中游地表温度高于上游而低于下游; 夜间表现为中游地表温度均高于上游和下游。进一步分析还可发现, 在剖面线上有许多参差不齐的“凹槽”存在, 说明研究区因下垫面特征的差异, 如主要的景观耕地、草地、林地及荒漠绿地分布, 使得地面温度产生很大差异, 这也进一步证明了石羊河流域特殊的地理分布和地表温度分布之间的相关性。由于流域上、中、下游海拔、地形、地表覆盖和下垫面类型分布差异很大, 加之近年来绿洲农业加速发展, 以上综合因素造成了上游地表温度普遍较低、中游温度常年较高, 并且温差相对稍小, 而下游地区地表温度季节差异明显, 昼夜差异亦非常大。

4 结论

本研究基于四期 MODIS 影像, 利用分裂窗算法反演了石羊河流域 2010 年不同季节地表温度, 并对地表温度的时空分布特征和影响因素进行了研究。结果表明:

(1) 在石羊河流域, 地表温度空间分布差异明显, 地表温度由南部至中部逐渐升高, 再到北部有所降低, 南低主要是祁连山山脉海拔较高, 受冰川、积雪、寒漠及植被蒸腾影响较大。中部由于地形平坦, 海拔不高, 植被丰富, 下垫面景观多样化, 地下水分布较多, 绿洲效应和城市热岛效应综合作用, 使得其温度较高, 且季节和昼夜温差都较小; 北部稍有降低是由于石羊河流域下游沙漠化比较严重, 沙质地比热容较低, 白天升温较快, 夜间降温也较快。

(2) 石羊河流域四季地表温度变化明显, 昼夜温差很大。其中, 春季温度分布在 $-13.45 \sim 29.27$ $^{\circ}\text{C}$ 之间; 夏季温度分布在 $-3.75 \sim 56.29$ $^{\circ}\text{C}$ 之间; 秋季温度分布在 $-10.15 \sim 32.67$ $^{\circ}\text{C}$ 之间; 冬季温度分布在 $-17.15 \sim 12.75$ $^{\circ}\text{C}$ 之间。流域内虽然有较多中小城镇, 但由于受干旱区绿洲-荒漠生态系统的控制和影响, 城镇热岛效应并不显著, 在影像上也未表现出明显的变异点, 但绿洲效应在中游地区对温度变化影响较为明显。

(3) 从地表温度空间分布上看, 在武威、民勤、古浪等绿洲地区地表热量丰富, 水土和植被效应显

著, 热量呈圈状空间递减趋势; 在下游的腾格里沙漠和巴丹吉林沙漠地区夏季温度最高, 祁连山东端的石羊河上游地区由于受常年积雪、河流、地表植被和海拔等因素影响地表温度较低。

由于决定地表温度高低的因素非常复杂, 利用地面气象观测点数据进行插值所得到的地表温度面数据精度相对较低, 而利用 MODIS 数据进行温度反演可以得到地表温度的空间分布数据, 而且将遥感数据和地表下垫面数据相结合能提高反演精度。因此, 利用遥感反演地表温度不仅具有重要的科学意义, 而且具有重要的应用价值。

参考文献 (References):

- [1] Dousset B, Gourmelon F. Satellite multi-sensor data analysis of urban surface temperatures and landcover[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2003, **58**(1-2): 43-54.
- [2] Small C. Multitemporal analysis of urban reflectance [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2002, **81**(2-3): 427-442.
- [3] Streutker D R. Satellite-measured growth of the urban heat island of Houston, Texas [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2003, **85**(3): 282-289.
- [4] Parkinson C L, Greenstone R. EOS Data Products Handbook (Volume 2) [R]. Greenbelt, Maryland: NASA Goddard Space Flight Center, 2000. http://eosps0.gsfc.nasa.gov/ftp_docs/data_products_vol2.pdf.
- [5] Wang Zhixia, Nan Zhuotong, Zhao Lin. The applicability of MODIS land surface temperature products to simulating the permafrost distribution over the Tibetan Plateau [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2011, **33**(1): 132-143. [王之夏, 南卓铜, 赵林. MODIS 地表温度产品在青藏高原冻土模拟中的适用性评价 [J]. *冰川冻土*, 2011, **33**(1): 132-143.]
- [6] Ouyang Bin, Che Tao, Dai Liyun, *et al.* Estimating mean daily surface temperature over the Tibetan Plateau based on MODIS LST products [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2012, **34**(2): 296-303. [欧阳斌, 车涛, 戴礼云, 等. 基于 MODIS LST 产品估算青藏高原地区的日平均地表温度 [J]. *冰川冻土*, 2012, **34**(2): 296-303.]
- [7] Zhong Lei, Ma Yaoming, Ma Weiqiang, *et al.* Land Surface heat fluxes in the middle reaches of Yarlung Zangbo River and its two tributaries derived from AVHRR and MODIS data [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2011, **33**(2): 309-317. [仲雷, 马耀明, 马伟强, 等. 西藏中部“两江两河”地区地表通量的卫星遥感估算 [J]. *冰川冻土*, 2011, **33**(2): 309-317.]
- [8] Voogt J A, Oke T R. Thermal remote sensing of urban climates [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2003, **86**(3): 370-384.
- [9] Price J C. Land surface temperature measurements from the split window channels of the NOAA 7 Advanced Very High Resolution Radiometer [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 1984, **89**(D5): 7231-7237.
- [10] Becker F, Li Z-L. Towards a local split window method over

- land surfaces [J]. *International Journal of Remotes Sensing*, 1990, **11**(3): 369—393.
- [11] Sobrino J A, Coll C, Caselles V. Atmospheric correction for land surface temperature using NOAA-11 AVHRR channels 4 and 5[J]. *Remote Sensing of Environment*, 1991, **38**(1): 19—34.
- [12] Coll C, Caselles V, Sobrino J A, *et al.* On the atmospheric dependence of the split-window equation for land surface temperature[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1994, **15**(1): 105—122.
- [13] Wan Z, Dozier J. A generalized split-window algorithm for retrieving land-surface temperature from space [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1996, **34**(4): 892—905.
- [14] Kaufman Y J, Gao B C. Remote sensing of water vapor in the near IR from EOS/MODIS[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1992, **30**(5): 871—884.
- [15] Mao K, Qin Z, Shi J, *et al.* A practical split-window algorithm for retrieving land-surface temperature from MODIS data[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2005, **26**(15): 3181—3204.
- [16] Mao K, Shi J, Li Z L, *et al.* An RM-NN algorithm for retrieving land surface temperature and emissivity from EOS/MODIS data [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2007, **112**(D21), doi: 10.1029/2007JD008428.
- [17] Rao Sheng, Zhang Huiyuan, Jin Taotao, *et al.* The spatial character of regional heat island in Pearl River Delta using MODIS remote sensing data [J]. *Geographical Research*, 2010, **29**(1): 127—136. [饶胜, 张惠远, 金陶陶, 等. 基于MODIS的珠江三角洲地区区域热岛的分布特征[J]. *地理研究*, 2010, **29**(1): 127—136.]
- [18] Qin Zhihao, Gao Maofang, Qin Xiaomin, *et al.* Methodology to retrieve land surface temperature from MODIS data for agricultural drought monitoring in China[J]. *Journal of Natural Disasters*, 2005, **14**(4): 64—71. [覃志豪, 高懋芳, 秦晓敏, 等. 农业旱灾监测中的地表温度遥感反演方法——以MODIS数据为例[J]. *自然灾害学报*, 2005, **14**(4): 64—71.]
- [19] Qin Z, Karnieli A, Berliner P. A mono-window algorithm for retrieving land surface temperature from Landsat TM data and its application to the Israel-Egypt border region [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2001, **22**(18): 3719—3746.

Spatial Distribution of Land Surface Temperature in Shiyang River Basin Based on MODIS Data

WEI Wei¹, SHI Pei-ji¹, YANG Wang-ming¹, WANG Xu-feng², WANG Xue-ping³

(1.College of Geographical and Environment Science, Northwest Normal University, Lanzhou Gansu 730070, China; 2.Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou Gansu 730000, China; 3.School of Civil Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou Gansu 730050, China)

Abstract: In this paper, the calculations of some parameters such as brightness temperature, atmospheric transmittance, surface emissivity and vegetation index are discussed. Then the land surface temperatures are calculated by using MODIS split windows algorithm of NASA on the base of cloudless MODIS thermal infrared data which were collected seasonally in 2010. It is found that the distribution of land surface temperatures is very different in different seasons and different regions. In spring, the land surface temperature varies between -13.45°C and 29.27°C . In summer, it varies between -3.75°C and 56.29°C . In autumn, it varies between -10.15°C and 32.67°C . In winter, it varies between -17.15°C and 12.75°C .

There are three land surface temperature zones from south to north. The temperature is very high in Wuwei, Minqin and Gulang oasis, where heat is rich and the domino effect among water, soil and vegetation are obvious. In the downstream Tengger Desert and Badain Jaran Desert, land surface temperature is extremely high in summer. Comparatively, in Qilian Mountains the temperature is very low because of perennial snow, high elevation and special land surface vegetation. In addition, MODIS data are able to supply a new way for monitoring thermal environmental change in a small basin. Especially, the derived results will be improved a lot if combine the MODIS data and surface observation.

Key words: thermal environment in a small basin; land surface temperature; split window algorithm; MODIS; Shiyang River basin