

基于 MODIS 数据的博斯腾湖 流域地表温度空间格局*

热伊莱·卡得尔, 玉素甫江·如素力, 阿迪来·乌甫,
艾则孜提约麦尔·麦麦提, 姜红

(新疆师范大学地理科学与旅游学院//流域信息集成与生态安全实验室//
新疆干旱区湖泊环境与资源重点实验室, 新疆 乌鲁木齐 830054)

摘要: 为了辨析博斯腾湖流域地表温度时空分布对不同下垫面的响应特征, 基于 MODIS 数据, 利用分裂窗算法反演研究区的不同季节地表温度并对反演结果进行精度检验。结果表明: ① MODIS 地表温度产品在博斯腾湖流域的精度良好, 可利用流域地表温度的空间格局研究; ② 博斯腾湖流域四季地表温度变化显著, 春季温度分布在 $-17.02 \sim 31.52$ °C 之间, 夏季温度分布在 $-9.99 \sim 56.04$ °C 之间, 秋季温度分布在 $-16.45 \sim 37.31$ °C 之间, 冬季温度分布在 $-32.42 \sim 10.79$ °C 之间; ③ 不同土地利用地表温度的分布总体上沙漠/沙地的地表温度均值最高, 旱地、裸岩等次之, 积雪、草甸最低。内陆湖流域内地表温度和土地覆盖类型存在明显的时空差异性, 在极端干旱地区绿色植被对温度降低具有一定的调节作用。

关键词: 博斯腾湖流域; MODIS; 地表温度反演; 分裂窗口算法; 土地覆盖

中图分类号: P407 **文献标志码:** A **文章编号:** 0529-6579(2017)05-0127-12

MODIS data-based study of the spatial distribution of land surface temperature in Bosten lake basin area

REYILAI Kadeer, YUSUFUJIANG Rusuli, ADILAI Wufu, AIZEZITIYUEMAIER Maimaiti, JIANG Hong
(Institute of Geographical Science and Tourism//Laboratory of Information Integration and
Eco-Security//Xinjiang Key Laboratory Lake Environment and Resources in Arid Zone,
Xinjiang Normal University, Urumqi 830054, China)

Abstract: In order to discriminate the response of the land surface temperature (LST) to underlying surface of Bosten lake watershed area, the land surface temperatures are calculated by MODIS split window algorithm and validated using observed metrological data. The results show that: ① MODIS LST product is applicable for the analysis of spatio-temporal distribution characteristics of LST in Bosten Lake watershed area. ② The distribution of land surface temperatures is very different in different seasons and different regions. The land surface temperature varies between -17.02 °C and 31.52 °C in spring, between -9.99 °C and 56.04 °C in summer, between -16.45 °C and 37.31 °C in autumn, and between -32.42 °C and 10.79 °C in winter. ③ Spatial distribution of land surface temperature is related to land

* 收稿日期: 2016-12-04

基金项目: 新疆维吾尔自治区青年科技创新人才培养工程项目 (QN2015YX009); 国家自然科学基金 (41764003, 41461006); 新疆师范大学博士启动基金项目 (XJNUBS1528)

作者简介: 热伊莱·卡得尔 (1991年生), 女; 研究方向: 资源环境遥感; E-Mail: Rayilakader@126.com

通信作者: 玉素甫江·如素力 (1975年生), 男; 研究方向: 应用3S技术和流域水文与生态系统研究;
E-mail: Yusupjan@xjnu.edu.cn

use types, which have affected the land surface temperature distribution in the study area. The highest LST is distributed in the desert/sandy land and the lowest LST distributed in glaciers and meadow area. The spatio-temporal distribution of LST is closely related to LUCC in the inland lake basins, and the green vegetation has the function of regulating climate and temperature in the oasis region, which is extremely vulnerable to the ecological environment of the arid region.

Key words: Bosten Lake Basin; MODIS; land surface temperature; split window algorithm; LUCC

陆面植被影响着地表物质能量平衡、气候、水文和生化循环, 可以作为气候和人文因素对环境影响的敏感指标, 而归一化植被指数 (NDVI) 作为陆面植被生长状况的指示因子, 对农作物长势、生态系统检测以及土地利用/覆盖变化等研究具有重要意义^[1]。陆面植被覆盖的变化, 直接导致用于地表潜热蒸发的地表水分含量发生变化, 使控制地表热通量的主要因子如反照率、热容、热传导率等发生改变, 从而导致地表温度发生显著变化^[2-3]。地表温度 (LST, Land surface temperature) 是研究地球表面上的物质交换、能量平衡与地表物理化学过程的关键参数, 也是小尺度和全球尺度地球表面上物理过程的一个重要因子。因此, 地表温度在生态学、气候学、生物化学、水文学等研究领域中具有重要的研究意义^[4]。有研究明显表现, 地表温度的变化能够改变地面与大气之间物质与能量平衡, 导致蒸散发、气温、降水和植被等发生变化, 进而对区域生态环境的保护与演变产生重要影响^[5-6]。受全球气候变暖及人为活动影响^[7]、干旱半干旱地区生态环境不断恶化^[8]、极端天气频繁出现、温室气体排放量不断上升、土地荒漠化面积日益增加、土壤肥力和植被覆盖度退化严重, 作为生态环境问题研究中的重要定量参数, 干旱半干旱地区地表温度研究受到国内外学者的广泛关注^[9-10]。

目前, 随着遥感技术快速发展, 关于遥感数据的地表温度研究已取得了广大进展, 同时国内外已经充分发展了很多实用的理论方法, 如谭志豪等采用单窗算法^[11]、马耀明等^[12]采用辐射传输方程方法, 1984 年 Price^[13]利用大气辐射传输理论, 对大气的影响做简化处理后提出分裂窗算法, 给出了具体的分裂窗算法, Changin 等^[14]采用分裂窗算法。Mostovoy 等^[15]利用 MODIS 地表温度产品对密西西比河流域的最低气温进行估算, 分析了像元分辨率的高低、土地覆盖类型及植被覆盖度等产生的

影响, 取得了较好的反演结果。Vancutesm 等^[5]基于 MODIS 标准夜间产品和日产品估算非洲地区最低气温、最高气温, 分析了不同季节和植被覆盖度等因素对最高气温估算的影响。热伊莱等^[16]对新疆焉耆盆地干旱半干旱地区地表温度时空特征进行反演并对反演结果进行精度验证, 在地形复杂的干旱半干旱地区仍具有较高的精度。田辉等^[17]基于 MODIS 地表温度产品和归一化植被指数, 采用植被温度混合状态指数 (VTCI) 方法对我国中西部山区旱情状况进行监测与分析, 验证了 MODIS 地表温度产品在山区具有较高精度与广泛的应用前景。

由于我国最大内陆淡水湖——博斯腾湖流域面积广大, 生态环境较为脆弱, 流域内农业生产的空间格局和生态规划, 都需要考虑地表温度和热量环境变化。博斯腾湖流域地处中国西北干旱区, 是天山山脉中的一个山间盆地, 塔里木河流域重要组成部分。目前, 该区域已有大量研究成果, 主要针对于水文循环, 土地利用/覆被变化, 绿洲生态评价等, 流域下垫面变化对 LST 的时空分布影响研究较少。本文利用四期 MODIS 数据和土地利用数据, 以分裂窗算法为研究方法对博斯腾湖流域 2010 年内不同季节的地表温度进行反演, 并对 LST 反演结果进行精度验证; 研究博斯腾湖流域地表温度的空间和时间分布特征, 以及与土地利用类型之间的关系进行定量分析, 进一步深入揭示 LST 的季节变化趋势分布。研究结果有助于对生态系统稳定性的评价提供指标, 也对干旱区流域的农业生产建设、农作物生产、生态环境保护等领域中具有重要意义。

1 研究区概况

博斯腾湖流域位于中国西北部新疆巴音郭楞蒙古自治州境内, 地理位置为 82.80° - 88.63° E, 40.73° - 43.57° N, 包括流入博斯腾湖的河流流域

(主要有开都河上游、黄水沟上游、清水河上游和 20 条时令河上游)、焉耆盆地和孔雀河流域, 总面积约 68 687 km²。流域东南部为平原盆地区, 海拔高度约为 856 ~ 4 798 m (图 1)。流域地势是北高、南低, 西高、东低, 高山、峡谷和盆地交错, 地形复杂。流域内有我国最大的内陆淡水湖泊—博斯腾湖, 是开都河的尾间和孔雀河的源头, 博斯腾湖在焉耆盆地随海拔高度的变化自上而下包括冰雪带、高山垫状植被带、高山草甸带、草原带、荒漠草原带、荒漠带等^[18]。整个博斯腾湖流域干旱少雨,

流域年降水量仅 47.4 ~ 68.1 mm, 年平均气温 8.2 ~ 11.5 °C, 日最高气温 ≥ 35 °C 的炎热天数据只有 0.1 ~ 4.3 d, 日最低气温 ≤ -20 °C 的寒冷天数也只有 0.1 ~ 0.9 d^[19]。由于研究区自然地理条件适宜于农业发展, 20 世纪 70 年代后绿洲区农业耕地面积处于增长趋势, 气候变化和人类活动的共同作用下, 博斯腾湖流域及其周围的绿洲面积发生明显变化^[20]。由此可见, 博斯腾湖流域已成为气候变化和人类活动影响明显的区域, 是最适合本研究目标的典型区。

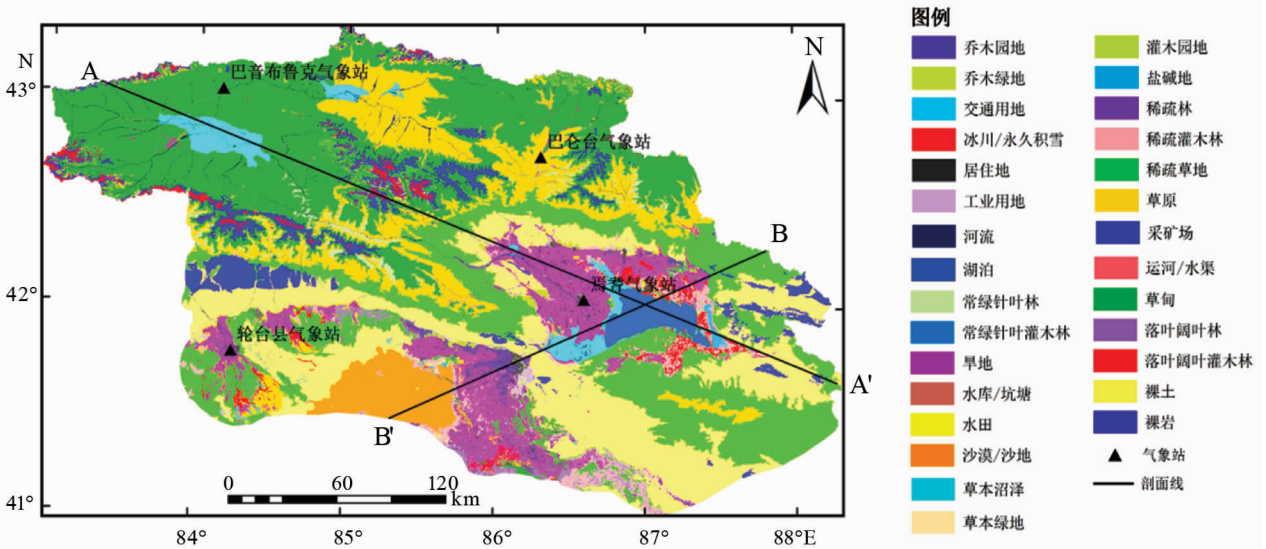


图 1 研究区及其土地利用/覆被分布和与气象站分布图

Fig. 1 Location of study area and distribution of Land use/cover change and meteorological station

2 数据来源及研究方法

2.1 数据来源

本文采用的 MODIS 数据, 空间分辨率为 1 000 m, 共有 7 个波段, 来源于 NASA (美国国家航空航天局) 网站。根据时空分辨率特点, 选择 2010 年 1、4、7、10 月的四季 MODIS LST 产品 (MOD11A2)。以 31、32 波段分裂窗算法的 LST 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, 分别代表流域的冬季、春季、夏季、秋季, 对内陆干旱流域的季节变化特征进行分析。用分裂窗算法计算白天、黑夜 LST 数据的基础上研究博斯腾湖流域的日变化特征。为研究博斯腾湖流域不同下垫面的 LST 变化情况, 统计获取不同地

表覆盖类型各时期的平均温度值。依据博斯腾湖流域的土地利用方式和分析精度要求, 将研究区域土地利用类型归并为 29 种二级地类, 包括裸土、沙漠/沙地、湖泊、草甸、草原等, 此数据由国家地球系统科学数据平台下载获取。

为了检验 MODIS 温度产品在该研究区反演 LST 的适用性, 选取博斯腾湖流域内的巴音布鲁克、巴仑台、焉耆、轮台等 4 个气象站的 2010 年内月时间序列的实际 LST 数据与 MOD11A2 数据在“点”尺度上进行验证。

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, 要计算星上亮度温度, 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) 函数求解星上亮度温度, 根据 Planck 公式计算 MODIS 第 31 和第 32 波段的亮度温度 T_{31} 和 T_{32} , 详细计算公式参见文献[21]。

2.2.2 大气透过率的计算 先找大气透过率之前, 需要先计算大气的水汽含量。对于 MODIS 数据, 大气层水汽含量可以根据 MODIS 数据第 2 和 19 波段来获得。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} 。最后, 采用 Mao 等^[22-23] 给予大气模拟 LOWTRAN 模拟得到的经验公式, 分别计算第 31 波段和第 32 波段的大气透过率, 具体公式参见文献[21, 24]。

2.2.3 地表比辐射率的计算 地表比辐射率是反演 LST 的重要参数, 组成成分与地表、地表结构等因素有关。地表比辐射率有 3 种基本地表类型构成的混合像元: 水域、绿色植被、裸土, 混合像元的平均比辐射率可以用地表构成比例进行估计。本文利用覃志豪等给出的混合像元比辐射率的计算公式进行估计地表比辐射率 ε_{31} 和 ε_{32} , 具体计算公式参见文献[25]。

2.2.4 分裂窗算法 用 Qin 等^[27] 提出的两因素模型, 根据亮度温度的线性组合来反演地表温度, 其计算公式如下^[26]:

$$T_s = A_0 + A_1 T_{31} - A_2 T_{32} \quad (1)$$

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, 具体分别定义如下:

$$A_0 = -64.363E_1 + 68.72575E_2 \quad (2)$$

$$A_1 = 1 + A + 0.440817E_1 \quad (3)$$

$$A_2 = A + 0.473753E_2 \quad (4)$$

$$A = \frac{D_{31}}{D_{32}C_{31} - D_{31}C_{32}} \quad (5)$$

$$E_1 = \frac{D_{32}(1 - C_{31} - D_{31})}{D_{32}C_{31} - D_{31}C_{32}} \quad (6)$$

$$E_2 = \frac{D_{31}(1 - C_{32} - D_{32})}{D_{32}C_{31} - D_{31}C_{32}} \quad (7)$$

$$D_{31} = (1 - \varepsilon_{31})(1 + (1 - \varepsilon_{31})\tau_{31}) \quad (8)$$

$$D_{32} = (1 - \varepsilon_{32})(1 + (1 - \varepsilon_{32})\tau_{32}) \quad (9)$$

$$C_{31} = \varepsilon_{31}\tau_{31} \quad (10)$$

$$C_{32} = \varepsilon_{32}\tau_{32} \quad (11)$$

最后, 通过分类结果与相应的 LST 反演结果图相叠加, 统计获取不同地表覆盖类型各时期的平均温

度值, 对 LST 与土地覆盖类型之间的关系进行定量分析。

2.2.5 趋势分析方法 借鉴线性倾向估计计算每个像元 2010 年四季的 LST 时间线性倾向率 (S)^[28]:

$$S = \frac{n \sum_{i=1}^n i \times \text{LST} - \sum_{i=1}^n i \sum_{i=1}^n i \times \text{LST}_i}{n \sum_{i=1}^n i^2 - (\sum_{i=1}^n i)^2} \quad (12)$$

式中, S 为线性倾向值, n 为月序列总长度 ($n = 4$), i 为具体计算月份, LST_i 为第 i 月份的 MOD11A2。当 S 为负表示, 随时间 i 的增加, LST 变化处于减少趋势, S 为正表示, 随时间 i 的增加, LST 变化处于增加趋势。

3 结果与分析

3.1 地表温度反演结果的验证

为保证 MODIS 温度产品在该地区 LST 分布的准确性, 本文采用博斯腾湖流域 4 个气象站的地温数据分别在“点”尺度上对 MOD11A2 数据进行精度验证 (图 2)。按研究区内四个气象站月序列平均 LST 的实测值, 利用 MODIS 温度产品提取 2010 年内 4 个气象站的 LST 值与观测地面站的 LST 进行精度验证可知, 由于各个气象站的地形、气候、环境等因素的不同, 两者之间的相关性在各个气象站不一。图 2 给出了 4 个气象站实测数据与反演数据的决定系数 R^2 都高于 0.9; 其中巴音布鲁克、焉耆、巴仑台、轮台气象站的各月平均实测数据和反演数据的 R^2 分别为 0.96, 0.98, 0.99 和 0.98。表明观测数据与反演数据具有较高的一致性。MODIS LST 产品可以充分反映地表温度的真实状况, 也可以作为地表温度的强度指标中具有一定的合理性。

3.2 土地覆盖类型与地表温度的关系

将反演生成区域地表温度图与博斯腾湖流域土地利用分类图叠加, 统计获取不同下垫面各时期的平均温度值。从图 3 上可以看出, 在研究区各土地类型中, 裸土、旱地、稀疏草地等不同地物的地表平均温度各不相同, 同类别土地类型之间的地表温度也存在一定的差异。总体而言, 白天, 冰川/永久积雪、常绿针叶灌木林、草甸、草本沼泽、居住地、工业用地、沙漠的 LST 依次升高; 夜间, 草

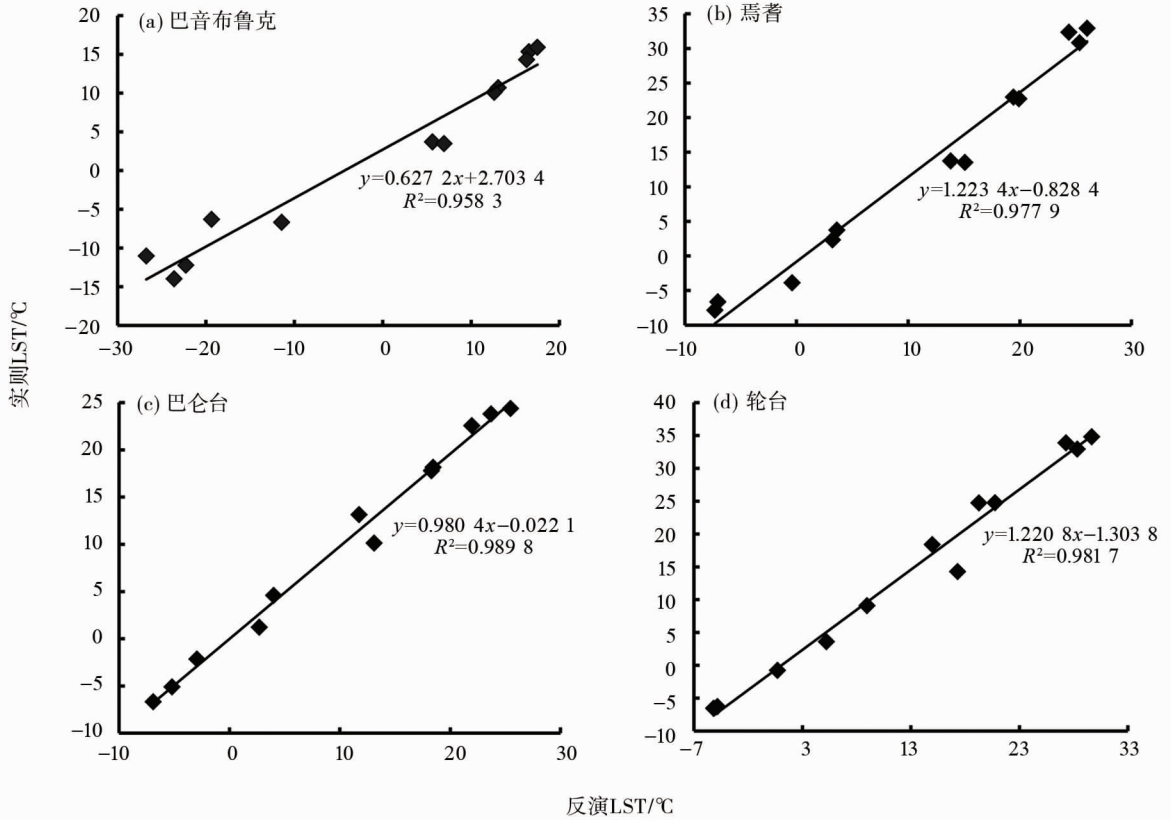


图 2 2010 年内地表温度反演的验证结果

Fig. 2 Validation results of surface temperature inversion in 2010

甸、冰川/永久积雪、常绿针叶林、草原、稀疏灌木林、居住用、工业用地、湖泊的 LST 依次增加。白天，沙漠、稀疏灌木林、盐碱地、裸土等的升温最快，对应的 LST 也较高；夜间，湖泊、乔木绿地、草本绿地、运河/水渠、水库等的降温最慢，水体温度最高；绿地、草地、林地由于植被生理活动的作用能够吸收热量引起温度更低。因此，它们的温度往往最低。然而，在不同的季节，区分白天和夜间，LST 变化有不同的差异。如，在冬季，白天，落叶阔叶林、水库、盐碱地、稀疏林、运河/水渠的 LST 最高，为 1.14, 0.60, 0.24, 0.17 和 -0.04 °C；而冰川/永久积雪、草甸、草本沼泽、采矿场、裸岩和沙漠 LST 最低，为 -16.96, -13.12, -12.73, -12.26, -7.48 和 -4.10 °C。夏季白天正好相反，沙漠、稀疏灌木林、盐碱地、裸土和落叶阔叶林等的温度最高，为 49.98, 44.87, 44.72, 44.53 和 44.45 °C，而湖泊、运河/水渠、水田的温度相对较低，为 25.45, 36.24, 38.06 °C。冬季夜间温度最低的为草甸、冰川/永

久积雪、草本沼泽、河流和沙漠的 LST 最低，为 -22.77, -22.65, -22.28, -21.35 和 -16.97 °C，最高的为湖泊、草本绿地、乔木绿地、水库、乔木园地，LST 为 -11.26, -11.57, -12.19, -13.87 和 -13.90 °C。夏季夜间工业用地、居住地、冰川/永久积雪、草甸、裸土的 LST 最低，为 2.85, 6.96, 7.08, 7.39 和 9.00 °C，而水体相对较高，如：湖泊的低温达到 19.72 °C。这种变化趋势，与不同土地覆盖类型的热容量性质密切相关。

研究表明，植被高低及覆盖程度对所在的 LST 影响很大。夜间，由于植被的本身特征引起 LST 降低比白天更为明显。

3.3 博斯腾湖流域地表温度时间分布特征

从 LST 分布的季节变化来看，博斯腾湖流域四季温度变化明显。其中，春季温度分布在 -17.02 ~ 31.52 °C 之间，夏季温度分布在 -9.99 ~ 56.04 °C 之间，秋季温度分布在 -16.45 ~ 37.31 °C 之间，冬季温度分布在 -32.42 ~ 10.79 °C 之间。7 月和 10 月温度差异最大，7 月份白天温差

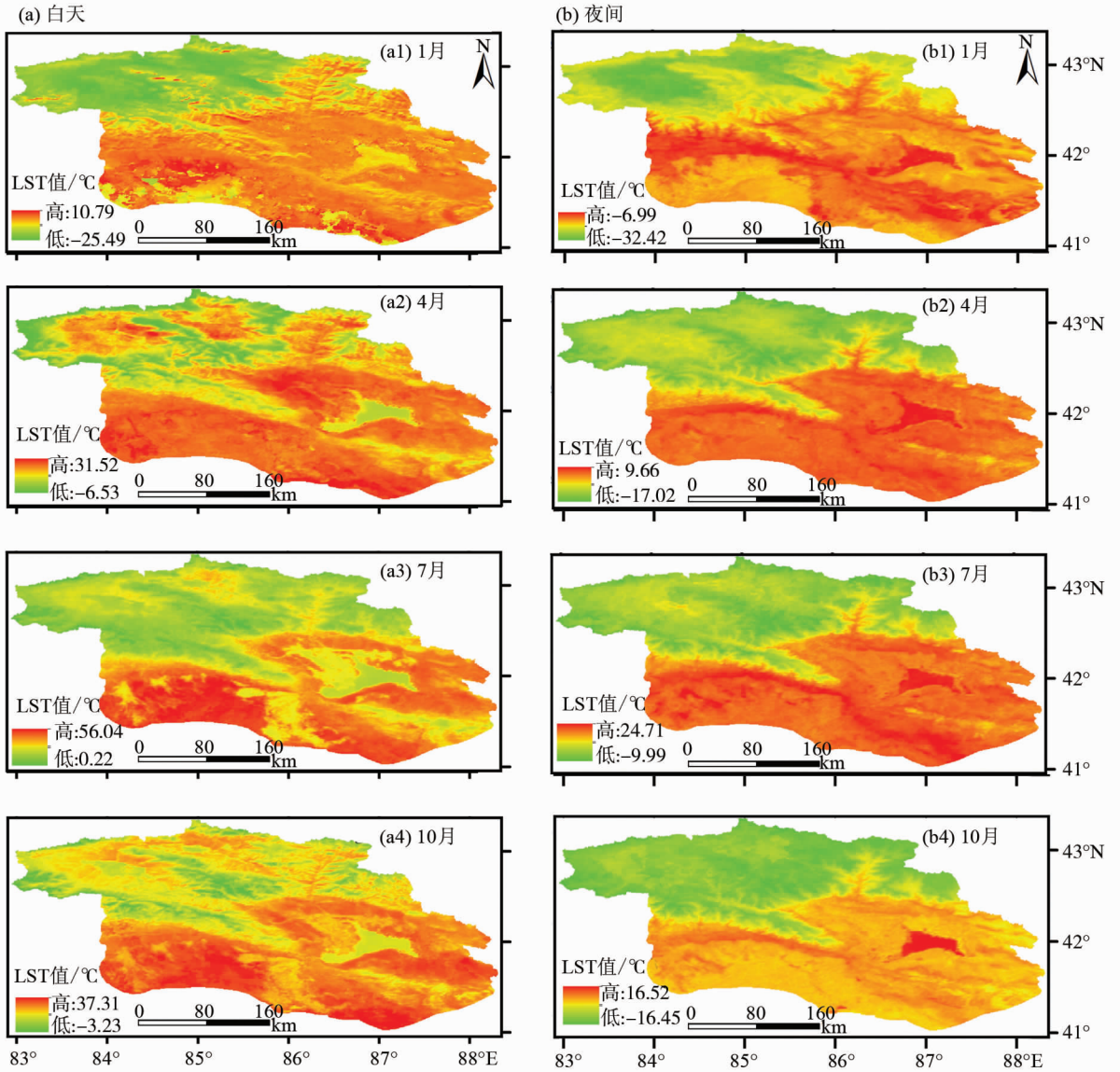


图 4 研究区 1, 4, 7 和 10 月的白天和夜间地表温度分布图

Fig. 4 Spatial distributions of day and night LST in Jan, April, July and Oct

3.4 博斯腾湖流域不同地域地表温度分布特征

为了进一步深入研究博斯腾湖流域 LST 空间分布情况, 分别从西北到东南和从东北到西南做 LST 不同月份和昼夜变化的剖面曲线。从图 5 和图 6 上可以看出, 距离为 0 ~ 122 km 范围是以草甸、冰川/永久积雪、草本沼泽、河流等土地类型为主的区域 LST 值呈现出“隆起”状态, 原因是冰川/永久积雪的覆盖范围较广, 植被数量分布较广、散热较慢, 引起 LST 比其他区域低一点; 122 km 以上范围内 LST 剖面线上有许多高低不齐的“凹槽”存在, 主要是因为研究区地表覆盖类型的特征差异, 如: 裸土、草甸、沼泽地、水域、沙漠, 使得

LST 产生差异。从东北向西南方向来看, 距离为 0 ~ 212 km 范围的地表覆盖类型主要是稀疏草地、旱地、湖泊、草本沼泽、裸土、沙漠/沙地、稀疏灌木林。剖面曲线上可以看出 LST 的分布规律, 冬季, 白天的规律依次为草本沼泽 > 湖泊 > 沙漠/沙地 > 稀疏草地 > 裸土 > 稀疏灌木林 > 旱地。冬季, 夜间的规律依次为湖泊 > 裸土 > 稀疏草地 > 旱地 > 稀疏灌木林 > 沙漠/沙地 > 草本沼泽, 因此在 LST 剖面曲线上呈现许多波峰和波谷, 突出显示的是距离为 58 ~ 95 km 范围内博斯腾湖水域的温度, 水域吸热较慢, 引起在不同季节白天呈现波峰、夜间呈现波谷。研究结果表明, 相同外部因素下, 由

于不同土地利用类型的本身特征在各时期引起不同的 LST 变化并深入揭示了不同土地利用类型对 LST 时空分布具有深刻的影响。

3.5 博斯腾湖流域 LST 季节变化趋势分布

本研究将采用趋势分析方法, 利用 2010 年四季的白天和夜间 LST 来反映研究区季节变化趋势。从图中可以看出, 图 7 (a) 上 10.52 ~ 18.52 的区域表示明显增加趋势, 3.9 ~ 10.52 的区域表示轻微增加趋势; 图 7 (b) 上 6.53 ~ 10.47 的区域表示明显增加趋势, 3.35 ~ 6.53 的区域表示轻微增加趋势。白天, 西北地区草原、草甸等所覆盖区域

和东南地区沙漠/沙地所覆盖区域的 LST 季节变化有明显增加趋势。究其原因, 一方面是不同的地表覆盖类型的本身特性, 常绿针叶林和阔叶林是聚落组成复杂, 层次结果明显, 能量转换和物质循环旺盛的季节不相同, 因而使 LST 较低; 草原、草地类型层次单一、植株矮小, 因此相对草地等类型所覆盖区域的 LST 也较低; 沙漠/沙地、裸土等土地类型的覆盖面积广、本身也大量吸收太阳辐射, 使 LST 较高。另一方面各 LST 分布所处区域的地形、日照、降水等气候条件也有所不同。

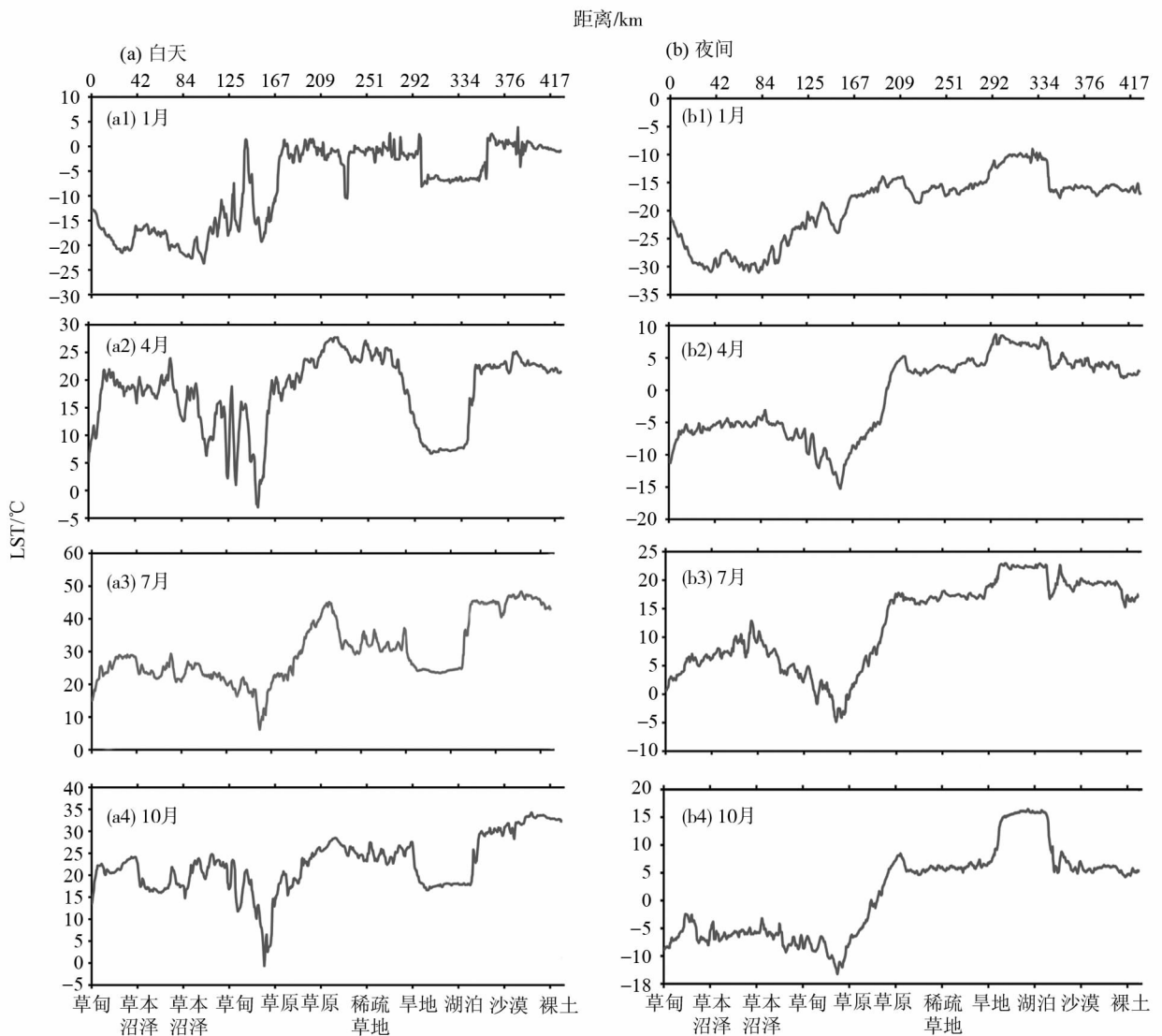


图 5 研究区不同月份的白天和夜间地表温度 A - A' 剖面曲线

Fig. 5 Spatial distribution of day and night LST for A - A' profile curves in different month

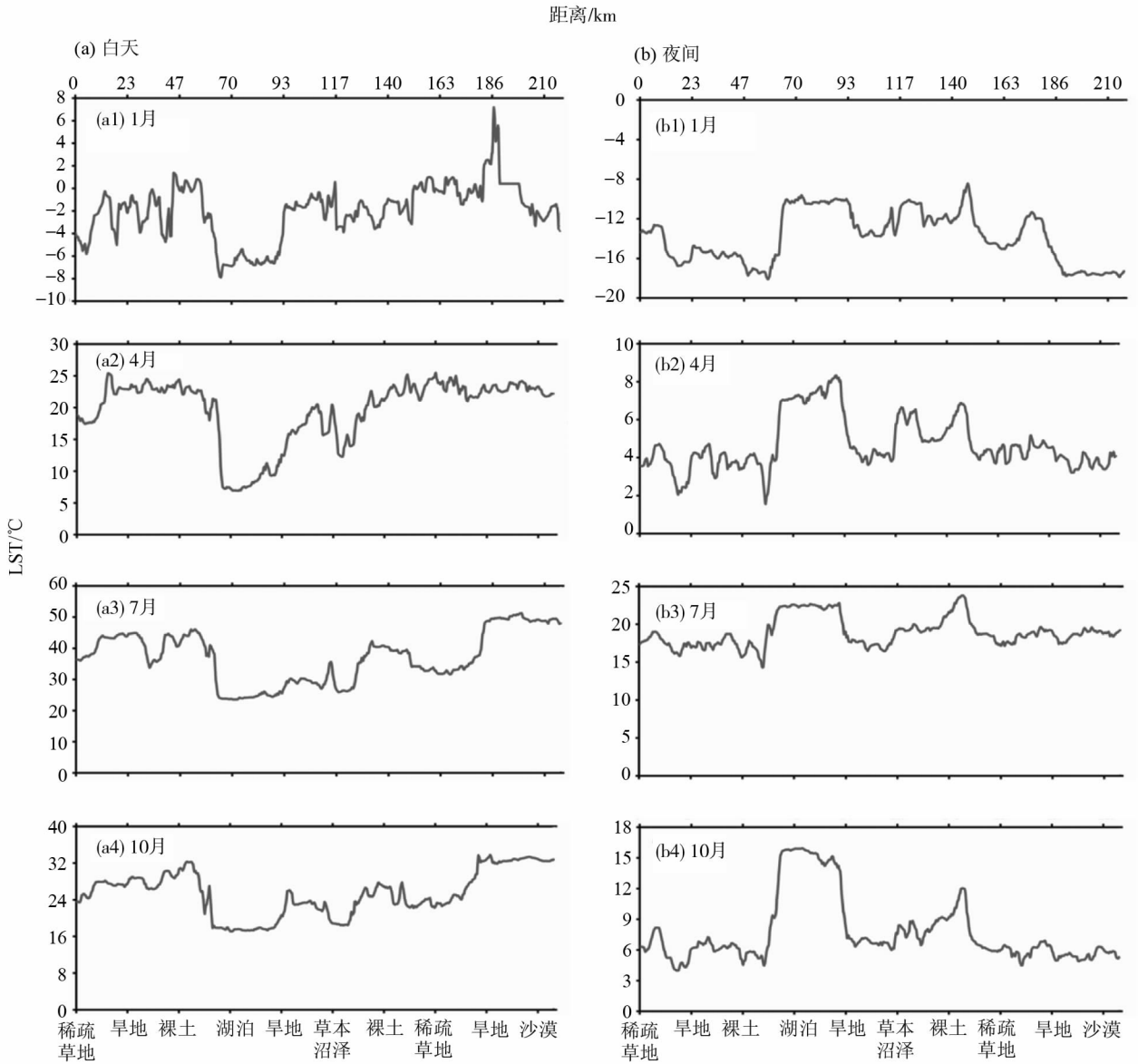


图 6 研究区不同月份的白天和夜间地表温度 B - B' 剖面曲线

Fig. 6 Spatial distribution of day and night LST for B - B' profile curves in different month

4 结 论

LST 与土地覆盖类型时空变化一直是众多学者关注的热点研究问题,我国西北部是对气候变化响应的敏感区域。本文基于 4 期 MODIS 影像,利用分裂窗算法反演了博斯腾湖流域不同季节 LST 变化并对反演结果进行精度验证,即对 LST 时空分布特征与土地覆盖类型之间的关系进行了研究,又进一步深入探讨 LST 季节变化的趋势分布,得出以下结论:

1) MOD11A2 与 4 个气象站月时间序列的实测

温度数据与反演温度数据的相关性 R^2 都高于 0.9,呈现出较高的一致性,说明 MODIS 温度数据在研究区总体上符合精度要求,可用于流域 LST 的空间格局研究。

2) 博斯腾湖流域四季 LST 变化明显,昼夜温差很大。其中春季温度分布在 $-17.02 \sim 31.52 \text{ } ^\circ\text{C}$ 之间,夏季温度分布在 $-9.99 \sim 56.04 \text{ } ^\circ\text{C}$ 之间,秋季温度分布在 $-16.45 \sim 37.31 \text{ } ^\circ\text{C}$ 之间,冬季温度分布在 $-32.42 \sim 10.79 \text{ } ^\circ\text{C}$ 之间。无论是哪一季节,LST 均表现出东南高于西北,冬夏两季温度变化和同一季节内昼夜温度变化明显。

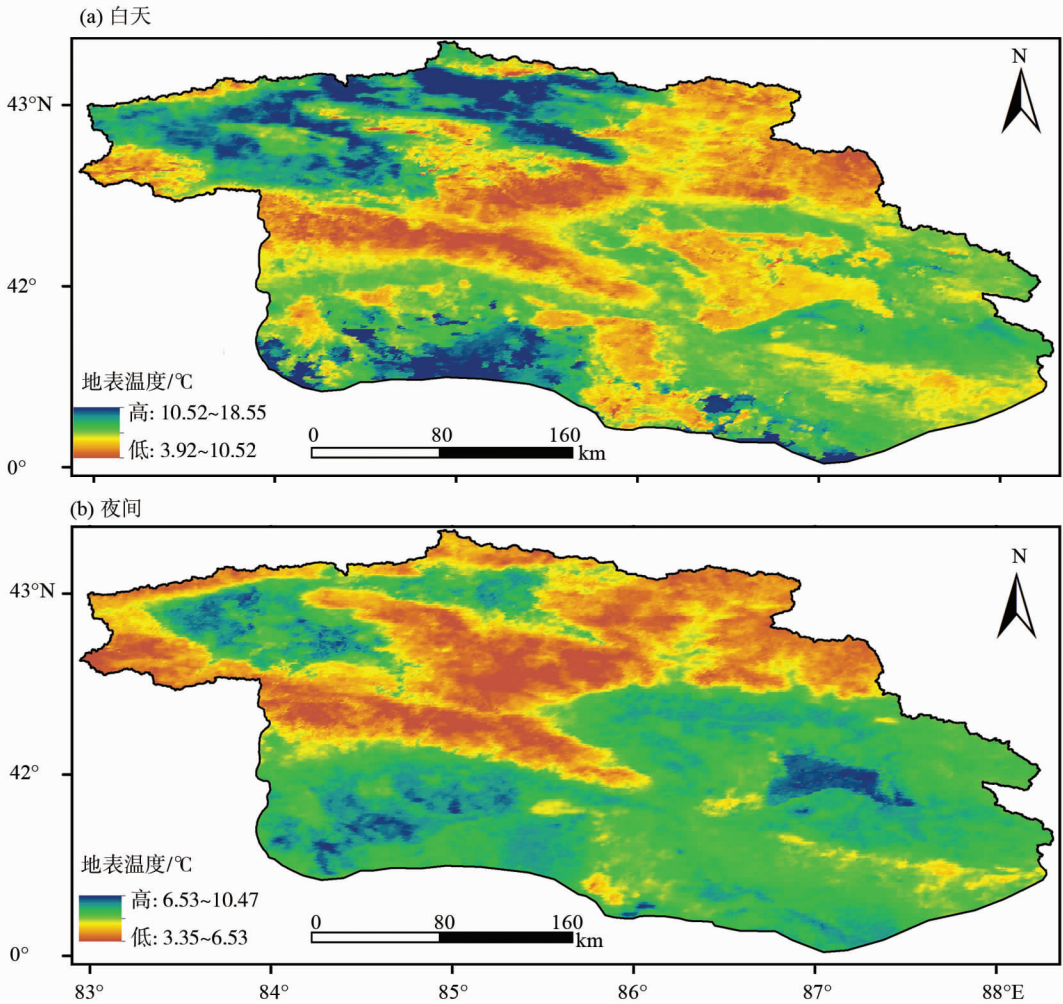


图 7 博斯腾湖流域 2010 年地表温度季节变化趋势

Fig. 7 The change trend of LST in Bosten Lake basin in 2010

3) 从不同地域 LST 分布特征来看, 在夏季东南地区裸土、沙漠/沙地、稀疏灌木林、旱地、裸岩等所覆盖区域地表热量丰富、温度最高; 中部地区湖泊、草本沼泽、落叶阔叶林、灌木园地等所覆盖区域的 LST 次高; 西北地区由于常年积雪、河流、植被覆盖范围广等原因 LST 普遍较低。

4) 博斯腾湖流域 LST 季节变化趋势来看, 白天, 西北地区草原、草甸等所覆盖区域和东南地区沙漠/沙地所覆盖区域的 LST 季节变化有明显增加趋势; 轻微减少趋势区域主要分布在湖泊、稀疏草地、裸土、草原所覆盖区域。夜间, 东南地区湖泊、稀疏草地、旱地、草本沼泽、沙漠/沙地、稀疏林等所覆盖区域有明显增加趋势; 轻微减少面积稍微扩大, 说明在夜间随着温度的降低, 主要是以草原、冰川/永久积雪、草本沼泽等土地类型使低

温面积稍微扩大。

参考文献:

- [1] 杨光华, 包安明, 陈曦, 等. 1998-2007 年新疆植被覆盖变化及驱动因素分析[J]. 冰川冻土, 2009, 31(6): 437-447.
YANG G H, BAO A M, CHEN X, et al. Study of the vegetation cover change its driving factors over Xinjiang during 1998-2007[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2009, 31(6): 437-447.
- [2] 姚永慧, 张百平, 韩芳. 基于 MODIS 地表温度的横断山区气温估算及其时空规律分析[J]. 地理学报, 2011, 66(7): 917-92.
YAO Y H, ZHANG B P, HAN F. MODIS-based air temperature estimation in the Hengduan mountains and its spatio-temporal analysis [J]. Acta Geographica sinica, 2011, 66(7): 917-927.
- [3] 戴晓燕, 张利权, 过仲阳, 等. 上海城市热岛效应形

- 成机制及空间格局[J]. 生态学报, 2009, 29(7): 3996-4004.
- HUANG X Y, ZHANG L Q, GUO Z Y, et al. Mechanism of formation of urban heat island effect and its spatial pattern in Shanghai[J]. Acta oecologica Sinica, 2009, 29(7): 3996-4004.
- [4] DOUSSET B, GOURMELON F. Satellite multi-sensor data analysis of urban surface temperature and land cover [J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote sensing, 2003, 58(12): 43-54.
- [5] VANCUTSEM C, CECCATO O, DINKU T, et al. Evaluation of MODIS Land surface temperature data to estimate air temperature in different ecosystems over Africa [J]. Remote Sensing of Environment, 2010, 114: 449-465.
- [6] WILSON J S, CLAY M, MARTIN E, et al. Evaluating environmental influence of zoning urban ecosystems with remote sensing [J]. Remote Sensing of Environment, 2003, 86: 303-321.
- [7] 李景林, 张山清, 普宗朝, 等. 近 50 年新疆气温精细化时空变化分析[J]. 干旱区地理, 2013, 36(2): 40-44.
- LI J L, ZHANG S Q, PU Z C, et al. Spatial-temporal variation of seasonal and annual air temperature in Xinjiang during 1961-2010 [J]. Arid Land Geography, 2013, 36(2): 40-44.
- [8] 王让会. 西部干旱区内陆河流域脆弱生态系统环境研究进展 - 以新疆塔里木河流域为例[J]. 地球科学进展, 2000, 16(1): 40-44.
- WANG R H. Progress in the study on fragile ecological environment in the west part of arid zone: taking Tarim river basin as an example [J]. Advance in Earth Sciences, 2000, 16(1): 40-44.
- [9] 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): 296-304.
- OU Y B, CHE T, DAI L Y, et al. Estimating mean daily surface temperature over the Tibetan plateau based on MODIS LST product [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2012, 34(2): 296-304.
- [10] 柯灵红, 王正兴, 宋春桥, 等. 青藏高原东北部 MODIS 地表温度重建及其气温对比分析[J]. 高原气象, 2011, 30(2): 277-287.
- KE L H, WANG Z X, SONG C Q, et al. Plateau meteorology reconstruction of MODIS land surface temperature in Northeast Qinghai-Xizang plateau its comparison with air temperature [J]. Plateau Meteorology, 2011, 30(2): 277-287.
- [11] 覃志豪, HANG Minghua, AMON Karnieli, 等. 用陆地卫星 TM 6 数据演算地表温度的单窗算法[J]. 地理学报, 2001, 56(4): 456-466.
- QIN Z H, HANG M H, AMON K, Mono-window algorithm for retrieving land surface temperature from Landsat TM6 data [J]. Acta Geographica Sinica, 2001, 56(4): 456-466.
- [12] 马耀明, 刘东升, 王介民, 等. 卫星遥感敦煌地区地表特征参数研究[J]. 高原气象, 2003, 22(6): 513-536.
- MA Y M, LIU D S, WANG J M, et al. Study on land surface parameters over inhomogeneous Landscape Dunhuang area by using satellite data [J]. Plateau Meteorology, 2003, 22(6): 513-536.
- [13] 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.
- [14] RI C G, LIU Q H, LI H, et al. Improved split window algorithm to retrieve LST from Terra/MODIS data [J]. Journal of Remote Sensing, 2013: 831-838.
- [15] MOSTOVOY G V, KING R L, REDDY K R, et al. Statistical estimation of daily maximum and minimum air temperatures from MODIS LST data over the state of Mississippi [J]. GIS Science and Remote Sensing, 2006, 43: 78-110.
- [16] 热伊莱·卡得尔, 玉素甫江·如素力, 高倩, 等. 新疆焉耆盆地地表温度时空分布对 LUCC 的响应[J]. 农业工程学报, 2016, 32(20): 259-266.
- REYILAI K, YUSUFUJIANG R, GAO Q, et al. Spatio-temporal response of land surface temperature to Land use/cover change in Yanqi Basin, Xinjiang [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2016, 32(20): 259-266.
- [17] 田辉, 马耀明, 胡晓, 等. 使用 MODIS 陆地产品 LST 和 NDVI 检测中国中、西部干旱[J]. 高原气象, 2007, 26(5): 1086-1097.
- TIAN H, MA Y M, HU X, et al. Monitoring drought in mid-western China using MODIS land products LST and NDVI [J]. Plateau Meteorology, 2007, 26(5): 1086-1097.
- [18] 周成虎, 罗格平, 李策, 等. 博斯腾湖环境变化及其与焉耆盆地绿洲开发关系研究[J]. 地理研究, 2001, 20(1): 15-23.
- ZHOU C H, LUO G P, LI C, et al. Environmental change in Bosten lake and its relation with oasis reclamation in Yanqi Basin [J]. Geographical Research, 2001, 20(1): 15-23.
- [19] 邱冰, 姜加虎, 孙占东, 等. 基于统计降尺度模型的博斯腾湖流域未来气温和降水变化趋势分析[J]. 资源科学, 2010, 32(6): 1133-1140.
- QIU B, JIANG J H, SUN Z D, et al. Analysis of trends in future temperature and precipitation in the Bosten lake in based on a statistical down scaling model [J]. Re-

- sources Science, 2010, 32(6): 1133 - 1140.
- [20] YUSUFUJIANG R, LI L H, SAJJAD A, et al. Dynamics model to simulate water and salt balance of Bosten Lake in Xinjiang, China[J]. Environmental Earth Sciences, 2015, 74(3): 2499 - 2510.
- [21] 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.
WEI W, SHI P J, YANG W M, 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.
- [22] 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.
- [23] MAO K, SHI J, LI Z, 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): 5455 - 5467.
- [24] KAUFAN Y J, GAO B C. Remote sensing of water vapor in the near IR from EOS/MODIS [J]. IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing, 1992, 30(5): 871 - 884.
- [25] 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.
QIN Z H, GAO M F, QIN X M, 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.
- [26] 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.
RAO S, ZHANG H Y, JIN T T, et al. The spatial character of region heat island in Pearl River delta using MODIS remote sensing data [J]. Geographical Research, 2010, 29(1): 127 - 136.
- [27] Z QIN, A KARNIELI, P BERLINER. 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.
- [28] 喻元, 白建军, 王建博, 等. 基于 MODIS 的关中地区实际蒸发时空特征分析[J]. 干旱地区农业研究, 2015, 33(3): 245 - 253.
YU Y, BAI J J, WANG J B, et al. Analysis on spatio-temporal characteristics of based on MODIS in Guanzhong region [J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2015, 33(3): 245 - 253.

(上接第 126 页)

- [14] 赵克勤. 集对分析及其初步应用[M]. 杭州: 浙江科学技术出版社, 2000: 198.
ZHAO K Q. Set pair analysis and its preliminary application [M]. Hangzhou: Zhejiang Science and Technology Publishing House, 2000: 198.
- [15] KUMAR P, FOUFOULA GEORGIOU E. A multicomponent decomposition of spatial rainfall fields: 2. self-similarity in fluctuations [J]. Water Resources Research, 1993, 29(8): 2533 - 2544.
- [16] 李艳, 陈晓宏, 张鹏飞. 北江流域径流序列年内分配特征及其趋势分析[J]. 中山大学学报(自然科学版), 2007, 46(5): 113 - 116.
LI Y, CHEN X H, ZHANG P F. Research on annual distribution and its trend of runoff in Beijiang River, Guangdong [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis SunYatseni, 2007, 46(5): 113 - 116.
- [17] RASHID M M, BEECHAM S, CHOWDHURY R K. Assessment of trends in point rainfall using continuous wavelet transforms [J]. Advances in Water Resources, 2015, 82: 1 - 15.
- [18] TAN C, HUANG B, LIU K, et al. Using the wavelet transform to detect temporal variations in hydrological processes in the Pearl River, China [J]. Quaternary International, 2017, 440: 52 - 63.
- [19] KANG S, LIN H. Wavelet analysis of hydrological and water quality signals in an agricultural watershed [J]. Journal of Hydrology, 2007, 338(1/2): 1 - 14.
- [20] 崔磊, 迟道才, 曲霞. 基于小波消噪的平稳时间序列分析方法在降雨量预测中的应用[J]. 中国农村水利水电, 2010(9): 30 - 32, 35.
CUI L, CHI D C, QU X. Application of Smooth and Steady Time Series Based on Wavelet Denoising in Precipitation Prediction [J]. China Rural Water and Hydropower, 2010(9): 30 - 32, 35.
- [21] 桑燕芳, 王栋. 水文序列小波分析中小波函数选择方法[J]. 水利学报, 2008, 39(3): 295 - 300.
SANG Y F, WANG D. Wavelet selection method in hydrologic series wavelet analysis [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2008, 39(3): 295 - 300.