

典型草原地区地表温度的反演与敏感性分析

王军^{1,2}, 李和平^{1,2}, 牛海³, 苗澍^{1,2}, 鹿海员^{1,2}

(1. 水利部牧区水利科学研究所, 呼和浩特 010020; 2. 中国水利水电科学研究院, 北京 100038;

3. 鄂尔多斯市工业与城市供水办公室, 鄂尔多斯 017000)

摘要: 准确分析地表温度变化规律, 对研究草原地区水热变化及早情监测具有重要意义。基于此利用单窗算法反演了典型草原地区不同土地利用类型的地表温度。结果表明: 卫星过境时刻流域地表温度的平均值在 37℃ 左右; 与其它土地利用类型相比, 水体及下垫面含水量较高的地区地表温度相对较低。为进一步探究归一化植被指数、大气平均作用温度变化对地表温度的影响, 本文通过设置两个参数不同的变化情景, 分析地表温度对两者变化的敏感性。结果表明: 大气平均作用温度大小变化对地表温度影响更为直接, 归一化植被指数对地表温度相对误差的影响较低。

关键词: 地表温度; 单窗算法; 敏感性分析; 典型草原

中图分类号: TP79

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2014)05-0102-04

Analysis of inversion and sensitivity of land surface temperature in typical grassland region

WANG Jun^{1,2}, LI Heping^{1,2}, NIU Hai³, MIAO Shu^{1,2}, LU Haiyuan^{1,2}

(1. Institute of Water Resources for Pastoral Area of MWR, Hohhot 010020, China; 2. China institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China; 3. Ordos Office of Industrial and Urban Water Supply, Ordos 017000, China)

Abstract: The analysis of the change rule of land surface temperature has important significance for the study of hydrothermal change and the drought monitoring in grassland region. The paper inversed the land surface temperature of different land use types based on Mono-window Algorithm on the typical grassland. The results show that the average value of land surface temperature is about 37℃ at the satellite transit time. Compared with the other land use types, the land surface temperature is lower in water body and the wet region. The paper analyzed the sensibility of land surface temperature on the change of two factors by setting up the different change scenarios of two parameters in order to probe the influence of NDVI and atmospheric average temperature on land surface temperature. The result shows that the change of atmospheric average temperature has greater impact on the land surface temperature, and the influence of NDVI on relative error of surface temperature is lower.

Key words: land surface temperature; mono-window algorithm; sensitivity analysis; typical grassland

作为影响地球表面物理、化学和生物过程的重要因子, 地表温度(LST)是研究地表与大气之间物质交换和能量平衡的重要参数, 在遥感、农业气象、生态环境等重要领域得到了广泛地应用和研究, 为旱情监测、气候变化分析提供了重要的参考依据^[1]。但由于土壤-植物-大气连续体(SPAC)是一个复杂多变的系统, 地表温度的变化受空气气温、湿度、光照、植被覆盖以及纬度等外界环境的影响较

大。分析这些影响地表温度空间分异的因子, 对认清地表温度变化规律具有重要意义。

草原是我国最大的陆地生态系统, 也是我国重要的绿色生态屏障, 与森林一起构成我国陆地生态系统的主体。它在维护生态平衡、保护人类生存环境、国民经济与社会发展等方面发挥着重要作用。目前, 我国 90% 的可利用天然草原出现了不同程度地退化^[2]。下垫面作为影响草原生态系统变化的

收稿日期: 2014-04-28; 修回日期: 2014-05-21

基金项目: 水利部公益性行业科研专项(201001039); 水利部科技推广计划项目(TG1202, TG1401); 内蒙古自治区新增“四个千万亩”节水灌溉工程科技支撑项目(20121036)

作者简介: 王军(1987-), 男, 山东泰安人, 博士研究生, 助理工程师, 研究方向为牧区节水灌溉与水资源高效利用。

重要因素,地表温度的变化直接决定下垫面土壤、植被进入大气中水分的多少,从而改变草原生态系统气候和环境。基于此,本文通过单窗算法反演我国草原地区地表温度,旨在分析草原地区不同土地利用类型地表温度的空间差异;通过设定不同的变化情景,分析归一化植被指数(NDVI)、大气平均作用温度等因素对地表温度空间变化的影响程度,找出影响地表温度变化敏感的因子,以期能为草原生态系统退化监测等方面提供基础支撑和参考。

1 研究区概况与数据准备

1.1 研究区概况

本文选取我国北方典型草原地区锡林河流域为研究对象。该流域位于我国内蒙古自治区境内,面积超过1万km²,流域境内的锡林河发源于内蒙古自治区克什克腾旗,由东南向西北进入锡林郭勒盟,最后注入查干淖尔湖。多年平均降水量为188mm;多年平均蒸发量约为1904mm,空间分布趋势由东南向西北递增,春旱、夏旱时有发生。流域范围内地势呈东南高西北低,流域海拔范围在902~1621m之间。流域土壤类型主要以栗钙土为主,少量的黑钙土分布在流域的东部及南部,沿锡林河两岸有零星分布的沼泽土及草甸土。流域土地利用类型包括耕地(面积占比2.3%;下同)、林地(1.7%)、草地(92.1%)、水体(0.2%)、城镇居民用地(0.9%)和未利用土地(2.9%)等六种类型(图1)。

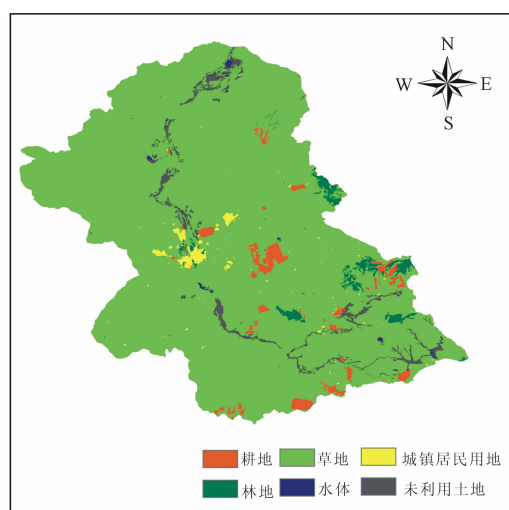


图1 锡林河流域2010年土地利用

1.2 数据准备

本文所用的基础数据主要包括气象资料和遥感影像资料。其中气象资料主要通过锡林浩特市及周边旗县的水文气象站获取;本文所选用的TM数据

是通过美国地质勘探局官网(<http://eros.usgs.gov>)获取,卫星过境时间是北京时间2010年8月31日11时左右。下载后首先利用ERDAS和ARCGIS等软件作图幅拼接和投影变换,将TM影像转化为自定义的投影坐标系统,然后利用掩膜技术裁剪、提取锡林河流域。

2 研究方法

2.1 地表温度的计算

单窗算法是基于地表热辐射传导方程提出的一种地表温度反演方法。已被作为利用遥感反演地表温度的重要方法在国内外许多国家和地区得到应用和认可^[3-5]。该方法结合气象数据,通过地表比辐射率、大气透过率和大气平均作用温度3个参数计算获取所需的区域地表温度^[6-11],具体公式见下:

$$T_s = \frac{67.356(C + D - 1) + [0.441(C + D) + 0.459]T_6 - DT_a}{C} \quad (1)$$

$$C = \varepsilon\tau \quad (2)$$

$$D = (1 - \varepsilon)[1 + (1 - \varepsilon)\tau] \quad (3)$$

$$T_6 = \frac{1260.56}{\ln(\frac{606.76}{L_6} + 1)} \quad (4)$$

式中: C 、 D 为中间变量; T_6 为卫星高度上遥感器所观测到的亮度温度,K; T_a 为大气平均作用温度,K; ε 为地表比辐射率; L_6 为第6波段辐射亮度, $W/(m^2 \cdot \mu m \cdot sr)$; τ 为大气透过率,与海拔高程有关。

Landsat-5卫星所接收的第6波段辐射亮度通过灰度(DN)值转化得到,计算公式如下:

$$L_6 = (\frac{L_{max6} - L_{min6}}{Q_{calmax} - Q_{calmin}})(Q_{cal} - Q_{calmin}) + L_{min6} \quad (5)$$

式中: Q_{cal} 为象元灰度值; L_{max6} 、 L_{min6} 分别为第6波段的最大和最小辐射率; Q_{calmax} 、 Q_{calmin} 分别为Landsat-5卫星对两者取值为 $Q_{calmax} = 255$, $Q_{calmin} = 1$ 。

2.2 地表比辐射率的计算

地表比辐射率作为计算地表温度的关键参数之一,其计算结果的好坏直接影响地表温度的计算精度。本文反演地表比辐射率是根据覃志豪等改进的公式得出^[12],首先借助TM影像中波段3和波段4计算NDVI,然后根据公式6和7反演地表比辐射率 ε 。

$$\varepsilon = \begin{cases} \varepsilon_s(1 - P_v) + \varepsilon_v P_v + 0.0038 P_v, & P_v \leq 0.5 \\ \varepsilon_s(1 - P_v) + \varepsilon_v P_v + 0.0038(1 - P_v), & P_v \geq 0.5 \end{cases} \quad (6)$$

$$P_V = \begin{cases} 1 & NDVI > 0.5 \\ \left[\frac{NDVI - NDVI_s}{NDVI_V - NDVI_s} \right]^2 & 0.2 \leq NDVI \leq 0.5 \\ 0 & NDVI < 0.2 \end{cases} \quad (7)$$
$$NDVI = \frac{\rho_4 - \rho_3}{\rho_4 + \rho_3} \quad (8)$$

式中： ρ_3 为第 3 波段反射率； ρ_4 为第 4 波段反射率； ε_s 为植被的地表比辐射率； ε_V 为裸土的地表比辐射率； $NDVI_s$ 为植被的归一化植被指数； $NDVI_V$ 为裸土的归一化植被指数； P_V 为比例参数。

3 结果与分析

3.1 地表温度空间分布

通过上述公式及相关文献计算大气平均作用温度、地表比辐射率和大气透过率 3 个关键参数^[13]，利用 ERDAS9.2 中 Model Maker 模块构建流域地表温度反演模型。图 2 是利用单窗算法得到的锡林河流域地表温度反演结果。从图中可以看出，流域内植被覆盖、海拔高度以及不同的地形地貌等共同影响了流域地表温度的空间差异。总的来看，流域内地表温度在 15~48℃ 之间，平均值为 37℃ 左右，卫星过境时间正值夏季中午时分，太阳辐射较强，致使流域地表温度普遍较高。

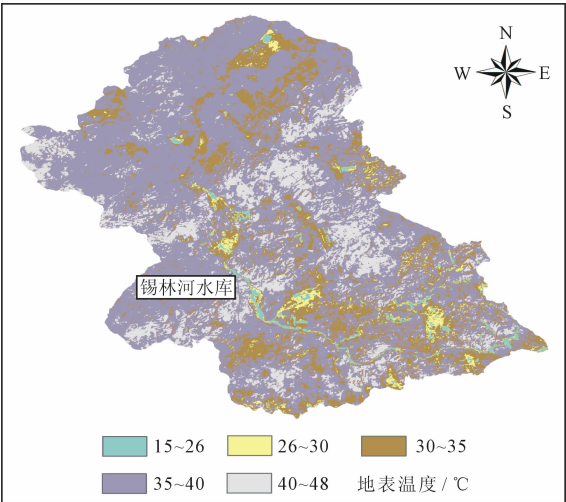


图2 地表温度空间分布结果

结合流域 2010 年土地利用分析(图 1),草地地表温度的平均值最高,水体的最低(表 1)。位于我国大兴安岭南麓余脉的上游地区,由于植被覆盖相对较好、土壤较为湿润、海拔较高等,这些地区地表温度相对较低;流域中游(图 2 中锡林河水库)是流域地表温度最低的地区,从土地利用构成分析,此处区域及周边多为水体或滩涂湿地,丰富的地表水资

源保证了表层土壤的湿润,同时水面蒸散会带走较多的热量,从而使得这些地区地表温度偏低。

表 1 不同土地利用类型地表温度反演结果 ℃

温度	耕地	林地	草地	水域	城镇居 民用地	未开发 用地
最低值	15	15	15	15	15	15
最高值	44	45	48	44	47	45
平均值	33	34	37	24	34	31

3.2 敏感性分析

(1)NDVI 敏感性分析。NDVI 是植被生长和空间分布密度的最佳表现因子,它的大小与植被分布密度呈线性关系。利用遥感获取的 NDVI 能综合反映象元内的植被类型、覆盖形态、生长状况等,因此,NDVI 敏感性一定程度上能说明流域下垫面条件对地表温度大小影响程度。卫星过境当天流域内 NDVI 平均值在 0.23 左右,该值反映了流域内植被覆盖整体稀疏、同时植被生长已进入生育阶段的中后期。设定流域内象元 NDVI 值上下浮动 5%(考虑 NDVI 范围有效性,浮动后的 NDVI 值若大于 1,按 1 处理;浮动后 NDVI 值小于 -1,按 -1 处理),在其他影响因素不变的情况下,利用单窗算法分析地表温度变化程度。

图 3 为 NDVI 变化对地表温度的影响结果,图中分析指标采用相对误差所占的百分比表示,其中横坐标为相对误差分布的区间,纵坐标为相对误差落在该区间的象元面积占流域总面积比例。结果显示,流域内 NDVI 上下浮动 5%,地表温度的相对误差变化主要分布在 6% 以内,变化相对较为稳定。其原因可能是 NDVI 引起的比例系数 P_V 微小变化对地表比辐射率影响较小,使得地表温度结果变化不大。

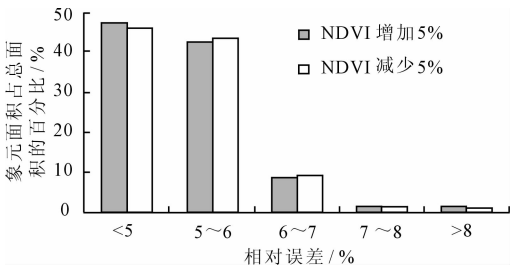


图3 NDVI 变化对地表温度影响

(2)大气平均作用温度敏感性分析。大气平均作用温度主要取决于大气剖面气温分布和大气状态^[13]。由于卫星过境时间很短,一般情况下很难实施实时大气剖面数据和大气状态的直接观测;通过

经验公式或反距离加权等方法对区域范围大气平均作用温度进行模拟,得到的结果必然存在一定误差。因此,本文通过设置流域内每个象元的大气平均作用温度增减 5℃,分析其变化对地表温度的影响。

图 4 是大气平均作用温度变化对地表温度的影响结果。结果显示,流域内大气平均作用温度上、下变动 5℃ 时,地表温度的相对误差变化结果较为分散,具体表现在:当大气平均作用温度减小 5℃,相对误差的大小基本控制在 6% 以内,较为稳定;当大气平均作用温度在原来基础上增加 5℃ 时,流域内绝大多数象元的地表温度相对误差超过了 6%,大气平均作用温度的降低对地表温度影响更大。这种显著变化的原因可能是大气和下垫面时时刻刻进行能量交换,这种能量交换直接表现在地表温度和大气平均作用温度的变化上,当大气平均作用温度达到一定程度后,温度的增加对地表温度影响越来越小。

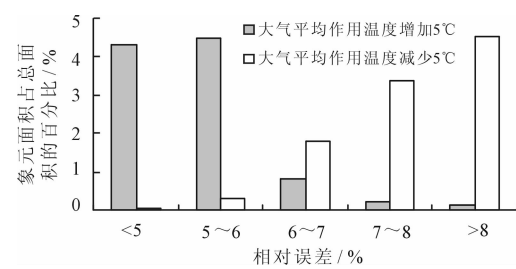


图 4 大气平均作用温度变化对地表温度影响

4 结 语

本文利用单窗算法对典型草原地区地表温度进行了反演,结果显示不同土地利用类型的地表温度的差异较大。通过设置流域内 NDVI、大气平均作用温度两个参数变化,分析了 NDVI 和大气平均作用温度变化对地表温度的影响程度,结果表明大气平均作用温度变化对地表温度的影响较为明显;地表温度对 NDVI 变化的敏感性相对较低。该结果对研究草原地区下垫面地表水热动态变化以及监测预防自然灾害具有一定的意义。

反演地表温度尽管采用了较成熟的参数估计方法,但仍有一些不可避免的因素导致误差的存在,如在计算大气平均作用温度时所需的气温等地面气象资料,存在研究区面积大、气象站点布控少等制约因素,使得气象数据在插值过程中会出现不确定的因素,从而导致误差的出现。另外,混合象元效应的存在、目视解译等同样会影响地表温度反演精度(图 1

中各类土地利用的最低地表温度相等的现象)。因此,消减地表温度反演过程中的误差,将是下一步研究工作的重点。

参考文献:

[1] 赵英时,等. 遥感应用分析原理与方法[M]. 北京:科学出版社,2003.

[2] 方精云,刘国华,徐嵩龄. 我国森林植被的生物量和净生产量[J]. 生态学报,1996,16(5):497-508.

[3] Qin Zhihao, 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.

[4] 戚鹏程,赵传燕,冯兆东,等. 干旱荒漠区土地利用变化对地表温度的影响[J]. 农业工程学报,2010,26(11):310-316.

[5] 邓玉娇,单海滨,胡民达. 基于 Landsat/TM 资料研究东莞市地表温度地理分区[J]. 水土保持研究,2012,19(2):62-65.

[6] 覃志豪, Zhang M H, Karnieli A, 等. 用陆地卫星 TM6 数据演算地表温度的单窗算法[J]. 地理学报,2001,56(4):456-466.

[7] Schneider K, Mauser W. Processing and accuracy of Landsat Thematic Mapper data for lake surface temperature measurement[J]. International Journal of Remote Sensing,1996,17(11):2027-2041.

[8] Schott J R, Volchok W J. Thematic mapper thermal infrared calibration[J]. Photogram metric Engineering and Remote Sensing, 1985,51,1351-1357.

[9] Wukelic G E, Gibbons D E, Martucci L M, et al. Radiometric calibration of landsat thematic mapper thermal band[J]. Remote Sensing of Environment,1989,28,339-347.

[10] Goetz S J, Halthore R N, Hall F G, et al. Surface temperature retrieval in temperate grassland with multire solution sensors[J]. Journal of Geophysical Research,1995,100(D12):25397-25410.

[11] Markham B L, Barker J L. Landsat-MSS and TM post calibration dynamic ranges, atmospheric reflectance and at-satellite temperature[J]. EOSAT Landsat Technical Notes, 1986(1),3-8.

[12] 覃志豪,李文娟,徐斌,等. 陆地卫星 TM6 波段范围内地表比辐射率的估计[J]. 国土资源遥感,2004(3):28-32+36+41.

[13] 覃志豪,Li Wen-juan,Zhang Ming-hua,等. 单窗算法的大气参数估计方法[J]. 国土资源遥感,2003(2):37-43.