

典型草原地区蒸散发研究与分析

王 军¹, 李和平¹, 鹿海员¹, 贾金良²

(1. 水利部牧区水利科学研究所, 呼和浩特 010020; 2. 鄂尔多斯市水利工程局, 内蒙古 鄂尔多斯 017000)

摘 要: 蒸散发(ET)作为影响水资源空间分布的关键因素之一, 准确监测、模拟其值的空间变化, 对提高水资源利用效率和保护区域生态环境具有重要意义。选择北方典型草原区锡林河流域作为研究对象, 通过气象数据和 TM 数据, 利用遥感和 GIS 技术, 构建了锡林河流域反演蒸散发的 SEBAL 模型。结果显示, 卫星过境当天流域蒸散发为 0~9.1 mm/d, 其中蒸散发在 0~2 mm/d 之间的像元占流域总面积的 70% 以上, 地表水资源不足是导致蒸散发较小的主要原因; 按照土地利用类型统计, 水域分布的地区日蒸散发相对较高, 草地分布的地区日蒸散发相对较低; 相关性分析显示, 地表温度的大小变化对 ET 空间分布影响较大。反演结果对流域尺度的水资源管理量化研究具有重要意义, 同时, 可为深入研究“水—草—畜”系统平衡奠定理论基础。

关键词: 蒸散发; SEBAL 模型; 相关性分析; 锡林河流域

中图分类号: TP79

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2013)02-0069-04

Research for Evapotranspiration of the Typical Grassland

WANG Jun¹, LI He-ping¹, LU Hai-yuan¹, JIA Jin-liang²

(1. Institute of Water Resources for Pastoral Area of the Ministry of Water Resources, Hohhot 010020, China; 2. Ordos Water Conservancy Engineering Bureau, Ordos, Inner Mongolia 017000, China)

Abstract: As the key factor affected uneven regional distribution of water resources, ET values estimated or simulated accurately are of the great significance for many fields, such as raising water resource use efficiency and its temporal and protecting ecological environment. Xilin River basin was selected as the case study that is typical grassland in China, sorted out TM data and meteorology data, and built the SEBAL model to calculate ET by remote sensing technology and GIS. The results showed that evapotranspiration of the basin ranged from 0 to 9.1 mm daily, but evapotranspiration of the 70% areas of the basin merely alternated between 0 and 2 mm daily. The result also showed that the ET_{24} of water areas was relatively higher and the ET_{24} of grassland was relatively lower, what's more, the change of surface temperature had greater influence on ET from the result of correlation analysis. The model inversion results have greater significance on the quantification of water resources management and establishment of the theory foundation to study the water-grass-livestock system balance.

Key words: evapotranspiration; surface energy balance algorithm for land; analysis of correlation; Xilin river basin

我国草原大部分处于干旱、半干旱地区, 水资源在牧区“水—草—畜”系统平衡中占有十分重要的地位。蒸散发(ET)作为重要的水循环要素, 是水资源高效利用、草原生态环境评价和水平衡维持的重要依据。准确监测、模拟 ET 时空变化, 对分析不同土地利用类型之间的 ET 差异、保护草地生态环境具有重要意义^[1]。本文选择我国北方典型草原区锡林河流域作为研究对象, 利用 SEBAL 模型反演得到卫星过

境当天流域的 ET, 并分析 ET 与几个关键地表参数的相关性。以期为进一步研究流域水资源时空变化以及解决水资源高效利用问题提供借鉴。

1 研究方法

随着遥感(RS)技术的发展, ET 监测和反演的研究逐渐从点尺度扩展到区域尺度上。遥感 ET 反演模型按照物理意义可分为 4 类: 经验统计模型、能量

余项模型、遥感数值模型和全遥感信息模型^[2-5]。综合考虑模型物理意义、计算精度等因素,本文选取 SEBAL 模型作为本次 ET 反演的模型。

SEBAL 模型又称陆面能量平衡模型,本质上是单层模型的“进化版”。该模型是由荷兰学者 Bastiaanssen 等开发建立起来的,其原理是基于能量平衡方程,首先利用气象站点提供的风速、气温等气象数据以及遥感 TM 数据,计算地表净辐射量、土壤热通量等;其次,在流域范围内选取“干点”和“湿点”两个特殊像元,结合气象资料,利用莫宁—奥布霍夫(Monin-Obukhov)定律递归迭代求得稳定的显热通量;最后用余项法求得 ET 后利用蒸发比不变法计算获得日蒸散发(ET₂₄)^[6-7]。模型计算表达式为:

$$\lambda ET = R_n - G - H - PH \tag{1}$$

$$\Lambda = \frac{\lambda ET}{R_n - G} \tag{2}$$

$$ET_{24} = \frac{24 \times 60 \times 60 \times \Lambda \cdot R_{n24}}{\lambda} \tag{3}$$

式中:R_n——地表净辐射量(W/m²);G——土壤热通量(W/m²);H——显热通量(W/m²);PH——用于植被光合作用和生物量增加的能量,予以忽略;λET——潜热通量(W/m²);λ——水的汽化热(J/kg);ET₂₄——日蒸散发(mm);R_{n24}——日地表净辐射量;Λ——蒸发比,无量纲。

2 研究区概况与数据

2.1 研究区概况

锡林河发源于内蒙古克什克腾旗,全长 175 km,总面积约为 11 171.59 km²。流域属于大陆性温带半干旱气候,多年平均降水量为 188 mm;多年平均蒸发量约为 1 903.5 mm,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 902~1 621 m。土壤类型以栗钙土为主,少量的黑钙土分布在流域的东部及南部,沿河两岸有零星分布的沼泽土及草甸土。流域土地利用类型以草地为主(附图 2)。

2.2 数据准备

模型的构建和运行不仅需要计算机软件辅助,更

重要的是基础数据的精度保证。根据 SEBAL 模型原理,地表参数的反演需要风速、气温等气象数据参与计算。基础数据准备包括气象资料和遥感影像两部分。气象资料的收集是通过锡林浩特市及周边旗县的水文气象站获取,包括地理纬度、海拔高程、气温、风速、日照时数和相对湿度等;遥感影像采用 Landsat-5 卫星接收的 TM 数据(北京时间 2010 年 8 月 31 号上午 10:48 左右),空间分辨率为 30 m(其中第 6 波段分辨率为 120 m,利用重采样技术将分辨率调为 30 m),该数据通过美国地质勘探局(USGS)网站免费下载获取。下载后首先利用 EADAS 9.2 和 ArcGIS 9.3 等软件作图幅拼接和投影变换处理,将 TM 数据转化到统一的投影坐标系统中,然后利用掩膜技术提取锡林河流域。

3 反演结果与分析

3.1 反演结果

借助基础资料反演得到地表净辐射量、土壤热通量和显热通量,利用能量平衡方法求得卫星过境当天流域 ET₂₄在 0~9.1 mm/d 之间,均值为 1.5 mm/d。为更好地分析流域 ET₂₄空间分布状况,本文对 ET₂₄重分类为 6 个等级(附图 3)。

反演结果显示,遥感数据接收时间正值流域降水较多、蒸发较大的时期,但流域范围内 70%的地区 ET₂₄在 0~2 mm/d 之间,由此可见,下垫面土壤水分不足在很大程度上限制了蒸散发过程;ET₂₄>5 mm/d的地区主要分布在以锡林河干、支流为中心线的周边地区,以及流域上游的达里诺尔湖附近,面积仅占整个流域的 1.2%。

按照耕地、林地、草地、水域、城乡工矿居民用地和未开发利用土地等将流域划分为 6 种土地利用类型,分别统计各类型的 ET₂₄。结果显示(表 1),ET₂₄最大的类型是水域,均值为 4.48 mm/d,这些地区地表相对较为湿润,水分充足是致使 ET₂₄较大的主要原因;草地的 ET₂₄均值仅为 1.85 mm/d,实地调查发现,由于近年来气候干旱及降雨减少,流域内一定范围的典型草原已退化成植被覆盖低、干旱少水的荒漠化草地或沙地,使得草地地区的蒸散发值整体较小。

表 1 不同土地利用类型 ET₂₄反演结果 mm/d

土地利用类型	耕地	林地	草地	水域	城乡工矿居民用地	未开发利用土地
ET ₂₄ 均值	2.98	2.64	1.85	4.48	2.76	3.44

3.2 可靠性检验

SEBAL 模型引入国内之后,国内研究者采用很多法对模型反演结果进行验证,如 Penman—

Monteith(P—M)公式、蒸渗仪等^[8-9]。参照研究者的研究成果,同时考虑区域所能提供实测资料的完整程度,模型反演结果验证选用 Penman—Monteith 公式

来进行。首先根据锡林浩特市等8个水文站提供的气象数据,通过P—M公式计算各站点潜在蒸散发,之后利用反距离加权插值得到锡林河流域潜在蒸散发。由于实测资料缺乏,本文通过计算潜在蒸散发与作物系数相结合来进行逆向验证^[10]。附图4是根据 ET_{24}/ET_0 计算出的每个像元作物系数,取值在0~1.4之间;结合流域土地利用图分析,水体及未开发利用土地的作物系数最大,主要分布在1~1.4之间,草地、耕地等土地的作物系数较小,卫星过境时间是2010年8月31号,属于作物生长后期,计算结果与联合国粮农组织手册中参考结果较为符合^[11]。从作物系数的空间分布来看,SEBAL模型的反演结果是合理的。

3.3 相关性分析

ET结果是由地表反照率、地表比辐射率和地表温度等参数直接参与计算得到的,为探究这些参数大小变化对ET敏感性影响,本文采用随机抽样的方法,在锡林河流域范围内随机抽取100个像元,进行 ET_{24} 与地表参数的相关性分析。

3.3.1 ET_{24} 和地表反照率相关性分析 地表反照率作为陆面能量平衡方程的重要参数,它可以改变整个地球大气系统的能量收支,影响流域或更大尺度的水文循环,进而引起局地以及全球气候的变化^[12]。经过计算, ET_{24} 与地表反照率之间的相关系数为-0.392,二者呈负相关,但相关性并不显著。图1是 ET_{24} 与地表反照率的散点分布图,由图1可知,随着地表反照率的增大, ET_{24} 有减小的趋势;反之,地表反照率越小, ET_{24} 越大。

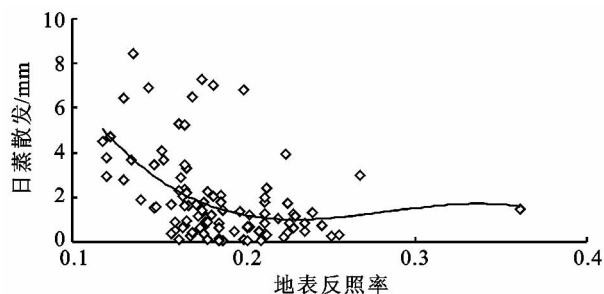


图1 ET_{24} 与地表反照率拟合关系

3.3.2 ET_{24} 和地表比辐射率相关性分析 根据覃志豪等^[13]提出的改进公式反演得出地表比辐射率, TM数据第3波段和第4波段分别是红外波段和近红外波段,根据两个波段可以计算归一化植被指数,进而反演得出地表比辐射率,它的大小主要取决于下垫面地物组成结构。经过计算, ET_{24} 与地表比辐射率之间的相关系数为0.505,二者存在较为显著的正相关。图2是 ET_{24} 与地表比辐射率的散点分布图,像元的

地表比辐射率越大, ET_{24} 越大;反之,地表比辐射率值较小的像元, ET_{24} 也较低。

3.3.3 ET_{24} 和地表温度相关性分析 弄清地表温度与蒸散发之间的关系,对研究地表与大气之间物质交换和能量平衡具有重要意义。图3为地表温度与 ET_{24} 相关性分析,经计算,二者的相关系数达-0.971,具有很高的线性关系。利用线性方程拟合得到两者关系式为: $y = -0.367x + 115.8$, R^2 为0.943,拟合程度较高。由图3可见,随着地表温度的增大, ET_{24} 不断减小,地表温度的变化直接影响蒸散发的大小。

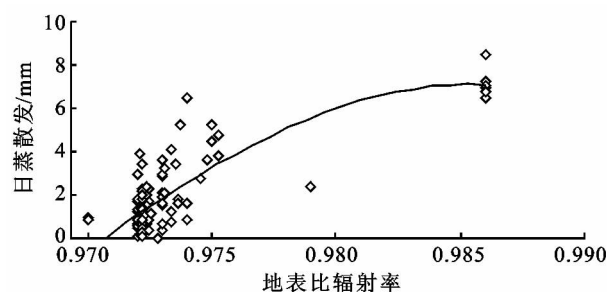


图2 ET_{24} 与地表比辐射率拟合关系

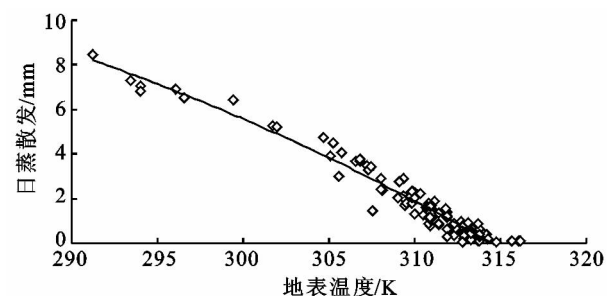


图3 ET_{24} 与地表温度拟合关系

4 结论

(1) 本文利用RS技术,通过SEBAL模型反演得到典型草原区锡林河流域蒸散发。反演结果显示,卫星过境当天流域蒸散发在0~9.1 mm/d之间,流域70%的地区蒸散发在0~2 mm/d之间,下垫面土壤水分不足在很大程度上限制了蒸散发过程;按照不同土地利用类型统计,水域分布的地区蒸散发均值最大。

(2) 通过计算蒸散发与几个关键地表参数的相关系数,得出地表比辐射率与 ET_{24} 呈正相关,地表反照率和地表温度与 ET_{24} 呈负相关;地表温度的变化对ET大小有很大影响。

(3) 本文反演得到日尺度上的蒸散发,当时间尺度扩展到作物生育周期或1 a时,由于存在遥感数据扫描周期过长的问题(TM数据周期为16 d),使得基于遥感技术的ET反演模型很难推算出长时间尺度

的蒸散发。该问题在未来一段时间仍是遥感反演模型研究的重点和难点。针对此类问题,在下一步研究过程中将尝试利用其它遥感数据(如 MODIS 数据),来研究长时间尺度的 ET 反演问题。

参考文献:

- [1] Huang J, van den Dool, Huug M, et al. Analysis of model calculated surface moisture over the United States (1931—1993) and applications to long-range temperature forecasts[J]. J. Clim., 1996, 9(6): 1350-1362.
- [2] 詹志明. 区域遥感蒸散发模型方法研究[J]. 遥感技术与应用, 2002, 17(6): 364-368.
- [3] 张长春, 魏加华, 王光谦, 等. 区域蒸发量的遥感研究现状及发展趋势[J]. 水土保持学报, 2004, 18(2): 174-177.
- [4] 郭晓寅, 程国栋. 遥感技术应用于地表面蒸散发的研究进展[J]. 地球科学进展, 2004, 19(1): 107-111.
- [5] 高彦春, 龙笛. 遥感蒸散发模型研究进展[J]. 遥感学报, 2008, 12(3): 515-518.
- [6] Bastiaanssen W G M, Menenti M, Feddes R A, et al. A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL): 1. formulation [J]. Journal of Hydrology, 1998, 212/213: 198-212.
- [7] Bastiaanssen W G M, Pelgrum H, Wang J, et al. A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL): 2. validation [J]. Journal of Hydrology, 1998, 212/213: 213-229.
- [8] 刘志武, 雷志栋, 党安荣, 等. 遥感技术 SEBAL 模型在干旱区腾发量估算中的应用[J]. 清华大学学报, 2004, 44(3): 421-424.
- [9] 陈玲. 基于改进的 SEBAL 模型估算区域蒸散发[D]. 兰州: 兰州大学, 2007.
- [10] 曾丽红, 宋开山, 张柏, 等. 基于 SEBAL 模型的扎龙湿地蒸散量反演[J]. 中国农业气象, 2008, 29(4): 420-426.
- [11] Richard G. A, Luis S, Pereira D R, et al. Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements (FAO irrigation and drainage paper No. 56) [M]. 联合国粮农组织, 1990: 195-207.
- [12] 林朝晖. 气候模式中的反馈机制及模式改进的研究[D]. 北京: 中国科学院大气物理研究所, 1996.
- [13] 覃志豪, Zhang M, 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, 6(4): 456-466.
- [14] Zhang Z Q, Yu D S, Shi X Z, et al. Effect of sampling classification patterns on SOC variability in the red soil region, China[J]. Soil and Tillage Research, 2010, 110(1): 2-7.
- [15] Yu D S, Zhang Z Q, Shi X Z, et al. Effect of sampling density on detecting the temporal evolution of soil organic carbon in hilly red soil region of South China[J]. Pedosphere, 2011, 21(2): 207-213.
- [16] 江苏沛县土壤普查办公室. 沛县土种志[M]. 北京: 中国农业出版社, 1985.
- [17] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 1999.
- [18] Sharon L L. Sampling: Design and Analysis[M]. Beijing: China Statistics Press, 2002.
- [19] Kerry R, Oliver M A. Comparing sampling needs for variograms of soil properties computed by the method of moments and residual maximum likelihood[J]. Geoderma, 2007, 140(4): 383-396.

(上接第 68 页)

- [5] 唐海明, 孙国峰, 肖小平, 等. 轮耕对双季稻田土壤全氮、有效磷、速效钾质量分数及水稻产量的影响[J]. 生态环境学报, 2011, 20(3): 420-424.
- [6] Mazzoncini M S, Tek Bahadur, Barberi Paolo, et al. Long-term effect of tillage, nitrogen fertilization and cover crops on soil organic carbon and total nitrogen content[J]. Soil and Tillage Research, 2011, 114(2): 165-174.
- [7] 张世熔, 孙波, 赵其国, 等. 南方丘陵区不同尺度下土壤氮素含量的分布特征[J]. 土壤学报, 2007, 44(5): 885-892.
- [8] 郭伟, 陈红霞, 张庆忠, 等. 华北高产农田施用生物质炭对耕层土壤总氮和碱解氮含量的影响[J]. 生态环境学报, 2011, 20(3): 425-428.
- [9] 陈军, 张红霞, 钟文, 等. 黄土丘陵区人工造林对不同土壤类型理化特性的影响[J]. 水土保持研究, 2011, 18(1): 42-47.