

锡林河流域长时间序列蒸散量遥感监测及其相关因子

于红博^{1,2}, 张巧凤^{1,2}, 包金兰³

(1. 内蒙古师范大学 地理科学学院, 呼和浩特 010022; 2. 内蒙古师范大学 遥感与地理信息系统重点实验室, 呼和浩特 010022; 3. 内蒙古自治区土地调查规划院, 呼和浩特 010055)

摘要: 蒸散的准确估算对于草地干旱监测、水资源分布及利用等具有重要的参考价值。选择锡林河流域为研究区, 基于地表能量平衡原理, 利用遥感方法对 2000—2014 年每年 7 月、2000 年、2007 年、2010—2014 年每年 4—9 月的 MODIS 影像数据进行处理, 结合同期气象资料估算出流域日蒸散量, 按所占日数加权得到月蒸散量。运用 FAO 推荐式进行了验证, 平均相对误差为 16.678%, 在误差允许范围之内, 说明该遥感方法有一定的可用性。结果表明, 在时间分布上, 2000—2014 年这 15 年流域蒸散量的时间变化没有固定的趋向, 基本与各年 7 月份降水量的趋势相一致, 一年中蒸散量的最大值主要出现在 6—7 月份。将月蒸散量与月日均气温、风速、大气相对湿度、水汽压和月降水量作了单因子相关分析, 表明, 与蒸散量最为相关的气象因子是降水量, 说明降水量是影响蒸散量大小的主要限制因子; 由于气温季节变化明显, 因此气温也是影响蒸散量的主要因子, 但在每年的同一时间段(如 7 月), 气温变化不明显时, 气温就不再是影响蒸散量大小的主要因子了。

关键词: 锡林河流域; 蒸散量; 遥感; 相关因子

中图分类号: P426.2; P407

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2017)06-0366-04

Long Time Series Remote Sensing Monitoring of Evapotranspiration in Xilin River Basin and Related Factors

YU Hongbo^{1,2}, ZHANG Qiaofeng^{1,2}, BAO Jinlan³

(1. College of Geographic Science, Inner Mongolia Normal University, Huhhot 010022, China;

2. Inner Mongolian Key Laboratory of Remote Sensing and Geography Information System, Inner Mongolia Normal University, Huhhot 010022, China; 3. Inner Mongolia Land Surveying and Planning Institute, Huhhot 010055, China)

Abstract: The study area is the Xilin River Basin. Remote sensing approach was used to retrieve instantaneous evapotranspiration based on the estimation of land surface fluxes by using MODIS images from July 2000 to July 2014 and from Apr. to Sept. of 2000, 2007, 2010—2014, and by using auxiliary environmental data from the same time periods. Daily evapotranspiration was estimated by scaling. Monthly evapotranspiration was weighted by the number of days. Results were verified by using the FAO method. This level of uncertainty was acceptable; therefore, the method that we concluded was applicable. In the time distribution, the evapotranspiration of fifteen years from 2000 to 2014 was no fixed trend. The trend of evapotranspiration was consistent with precipitation. The maximum evapotranspiration of a year mainly occurred in June and July. The single factor correlation analysis of the monthly evapotranspiration and monthly average temperature, wind speed, relative air humidity, vapor pressure, and monthly precipitation showed that the most relevant meteorological factor with evapotranspiration is precipitation. So precipitation is the main limiting factor of evapotranspiration. Air temperature is also an important factor because of its obvious seasonal changes. But air temperature is not the main factor when it does not change obviously such as in July from 2000 to 2014.

Keywords: Xilin River Basin; evapotranspiration; remote sensing; related factors

收稿日期: 2016-10-14

修回日期: 2016-11-11

资助项目: 国家自然科学基金项目“锡林河流域蒸散量估算模型建立及长时间序列蒸散分析研究”(41661009); 内蒙古自然科学基金资助项目“锡林河流域生态用水遥感反演及气候响应特征研究”(2013MS0611)

第一作者: 于红博(1977—), 女(满族), 内蒙古呼和浩特市人, 博士, 副教授, 主要从事生态建模与遥感图像处理方面的研究。E-mail: yuboge2003@sohu.com

蒸散是陆地生态系统水文循环的重要环节,热量的释放和吸收是伴随着蒸散过程同时进行的,是水分和能量平衡过程中最重要的输出部分,直接影响生态系统的功能过程。内蒙古典型草原处于半干旱地区,降水稀少,存在着较严重的缺水问题,准确计算和评价典型草原植被的蒸散量是研究草原水分平衡的基础。从20世纪60年代至今,众多学者做了大量的研究和贡献,蒸散发的监测也由传统的方法发展到了遥感定量反演,利用遥感技术及气象数据发展区域遥感蒸散模型取得了很大进展,例如蔡玉林等^[1]利用SEBAL模型基于MODIS数据产品和野外实测气象数据对大沽河流域的蒸散量进行估算,并证实模型反演结果与实测值之间具有良好的一致性;张圆等^[2]将Landsat8与GEOEYE-1数据进行了融合,利用SEBS模型计算了天山北坡县域蒸散量。这些模型的发展和应用对于蒸散遥感定量反演的准确和完善起到了积极的作用。作为草原生态需水的消耗量,蒸散的准确估算对于草地干旱监测、水资源分布及利用等具有重要的参考价值,对于合理利用有限水资源具有重大意义。

锡林河流域地表河流系统不发育,地下水是锡林河流域最主要的可利用水源,近年来工业用水增长迅速,超量开采地下水造成地下水位大幅下降,加之长期以来过度放牧,出现了植被退化、土地沙化等环境问题,水资源已成为制约该地区生态和社会经济健康发展的重要因素。本研究运用遥感方法,结合气象资料,反演流域蒸散量,来初步探究锡林河流域蒸散量的时间变化及其与相关因子的关系。这对科学有效地利用干旱地区的有限水资源,为生态环境发展的可持续性以及水资源的可持续利用具有重要的现实意义。

1 研究区概况

锡林河流域位于内蒙古高原中东部,它东缘属于大兴安岭西麓低山丘陵区,地势由东向西逐渐降低,东南部的嘎顺山最高海拔为1 505.6 m,西北部的锡林河下游,最低处小于900 m,全流域相对高差达600 m,流域总面积约10 786 km²,总长175 km^[3-4]。该流域地貌具有明显的分区性,锡林河以南为多级玄武岩台地,锡林河中下游是以低山丘陵与高平原相间分布为特征的内蒙古高原的一部分。该区的土壤具有明显的地带性,即由东南向西北有规律地分布着黑钙土、暗栗钙土和淡栗钙土。

气候属大陆性温带半干旱气候,冬季寒冷干燥,夏季温暖湿润,根据多年气象资料,锡林河内从东南向西北降水量逐渐递减,东南部的年降水量为400 mm左右,

西北部为250 mm左右,年平均气温则从东南向西北逐渐增加,锡林河中游的中国科学院内蒙古草原生态系统定位研究站的多年平均气温为0.5℃,锡林河下游的锡林浩特的多年平均气温为2.1℃^[4]。

锡林河流域地带性植被的基本类型是草原(草甸草原、典型草原),约占植被总面积的85%;锡林河上游地势较高的三级熔岩台地上,代表群系为贝加尔针茅(*Stipa baicalensis*)草原和线叶菊(*Filifoliusibiricum*)草原,中游暗栗钙土亚带的代表群系为羊草(*Leymus chinensis*)草原和大针茅(*Stipa grandis*)草原,下游淡栗钙土亚带的代表群系为克氏针茅(*Stipa krylovii*)草原和冷蒿(*Artemisia frigida*)草原^[4-5];在锡林河流域流经区域的地段上形成了湿地植被,此外,在锡林河流域还有浑善达克沙地东北端榆树疏林、灌丛、草本镶嵌分布所形成的沙生植被。

2 数据来源

2.1 气象数据

由中国气象科学数据共享服务网提供的2000—2014年每年6月25日—8月12日、2000年、2007年、2010—2014年每年3月5日—10月15日逐日气象数据,包括平均气温、大气相对湿度、2 m高度处风速、实际水气压、降水、实际日照时数。气象数据包括研究区锡林浩特市及周边阿巴嘎旗、东乌珠穆沁旗、克什克腾旗、西乌珠穆沁旗、多伦县、化德共7个站点的站点数据。以上气象数据均利用Kriging方法进行了插值处理。

2.2 遥感数据

遥感影像资料为美国NASA提供的2000—2014年每年6月25日—8月12日、2000年、2007年、2010—2014年每年3月5日—10月15日锡林河流域16 d合成MODIS卫星数据,是经过验证、MODIS科学组推荐使用的L3级产品。包括地表温度产品MOD11A2,地表窄波段反照率产品MCD43A3,植被指数和太阳天顶角产品MOD13A1,版本均为5.0。经过处理,数据分辨率统一至500 m,投影为Albers Conical Equal Area。

2.3 数据处理软件

用MRT软件对MODIS影像进行投影转换,用Envi、PCI和ArcGIS软件对MODIS影像进行处理、运算、分析和制图。

3 理论及研究方法

本研究主要基于地表能量平衡原理估算流域蒸散量^[6]:

$$LE = R_n - G - H \quad (1)$$

式中: R_n 表示地表净辐射通量 (W/m^2); G 表示土壤热通量 (W/m^2); H 表示显热通量 (W/m^2); LE 表示潜热通量 (W/m^2)。首先估算地表特征参数各分量(归一化植被指数, 植被盖度, 地表比辐射率, 地表反照率), 然后得到地表能量平衡各分量(净辐射通量, 土壤热通量, 显热通量, 潜热通量), 由此算出瞬时蒸散量, 通过积分运算, 时间尺度扩大到日蒸散量, 根据包括该月中日子的遥感结果按所占日数进行了加权得到月蒸散量。具体方法及公式详见文献^[6]。

4 结果检验

利用FAO推荐的估算参考作物蒸散的Penman-Monteith(简称P-M)公式和作物系数对2012年3月29日—10月6日每8d的日均蒸散量(共计23个时间段)进行了计算, FAO推荐的估算参考作物蒸散的P-M公式为^[7]

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T_d + 273.16} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)} \quad (2)$$

式中: ET_0 表示参考作物蒸散量 (mm/d); R_n 表示作物表面的净辐射通量 [$MJ/(m^2 \cdot d)$]; G 表示土壤热通量 [$MJ/(m^2 \cdot d)$]; Δ 表示饱和水汽压斜率 ($kPa/^\circ C$); e_s 表示饱和水汽压 (kPa); e_a 表示实际水汽压 (kPa); γ 表示干湿球常数 ($kPa/^\circ C$); u_2 表示2m高度处的风速 (m/s); T_d 表示日均温 ($^\circ C$)。通过参考作物蒸散量 ET_0 和作物系数 K_c 可以确定某种作物的蒸散量, 即

$$ET = K_c \cdot ET_0 \quad (3)$$

式中: ET 表示作物蒸散量 (mm/d)。参考FAO56文件, 作物系数取值如下: 4—5月份为0.8, 6—7月份为0.95, 8—9月份为0.85。同时对遥感反演的值进行了流域平均, 二者进行对比(图1), 平均相对误差为16.678%, 在误差允许范围之内。因此, 说明该遥感方法有一定的可用性。

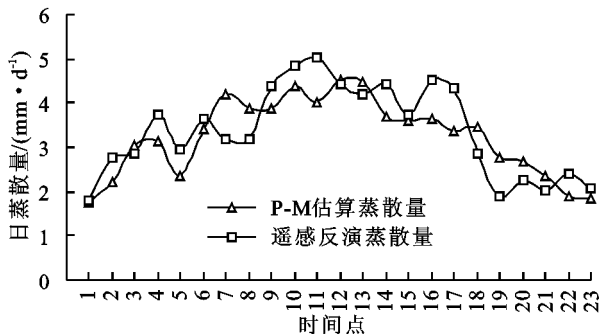


图1 P-M估算蒸散量与遥感反演蒸散量对比

5 结果与分析

5.1 锡林河流域蒸散量时间变化分析

图2为反演的锡林河流域2000—2014年每年7月份蒸散量变化曲线图, 由图可知, 蒸散量的时间变化没有固定的趋向, 最大蒸散量出现在2012年, 最小蒸散量为2000年, 基本与每年7月份降水量的趋势相一致。

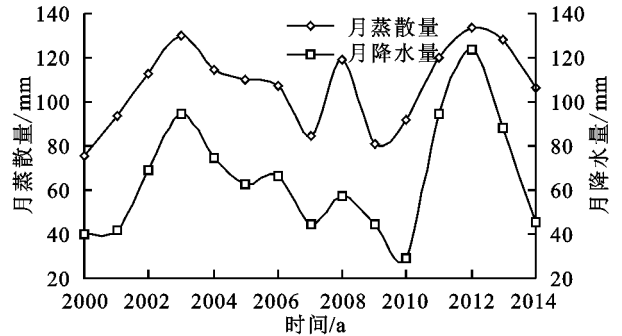


图2 锡林河流域2000年7月—2014年7月份
月蒸散量与月降水量年际变化

图3为反演的锡林河流域个别年份4—9月份生长季月蒸散量变化曲线图, 由图可知, 曲线变化不一。蒸散量变化曲线反映了植物在整个生长季的蒸散耗水状况。2000年和2007年为欠水年, 2000年蒸散量变化曲线为双峰曲线, 两个峰值点分别出现在6月份和8月份, 2007年为单峰曲线, 其峰值点出现在5月份, 虽然两条曲线形状不一, 但它们的共同点是变化均比较平缓。2010年和2011年为平水年, 2010年为双峰曲线, 两个峰值点分别出现在5月份和7月份, 但均不突出, 2011年为单峰曲线, 其峰值点出现在7月份, 曲线从峰值点向两侧逐渐降低。2012—2014年为丰水年, 三条曲线均为单峰曲线, 峰值点分别出现在6月份、7月份和6月份, 曲线从峰值点向两侧逐渐降低。在丰水年, 降水充沛, 有充足的水分可供蒸发, 而6—7月份正是植物生长旺季, 植物长势最好, 叶面积指数最大, 可供蒸腾的面积最大, 温度较高, 因此蒸散量最大值主要出现在6—7月份。在欠(平)水年, 降水量(较)少, 水分是蒸散的主要限制因子, 因此最大值的出现主要与降水最大值出现的时间相一致。

5.2 影响锡林河流域蒸散量因素分析

将7年(2000年、2007年、2010—2014年)生长季(4—9月份)期间的月蒸散量与月日均气温、风速、大气相对湿度、水汽压和月降水量做单因子相关分析, 结果表明, 蒸散量与降水量的相关性最大, 相关系数为0.818, 其次为水汽压(0.514)和气温(0.489), 这3个量均为 $p < 0.01$ 显著正相关, 与风速和大气相对湿度的相关性较小, 分别为0.030和0.280, 均为正相关。由此可知, 水分和气温是影响蒸散量大小的主要限制因子。

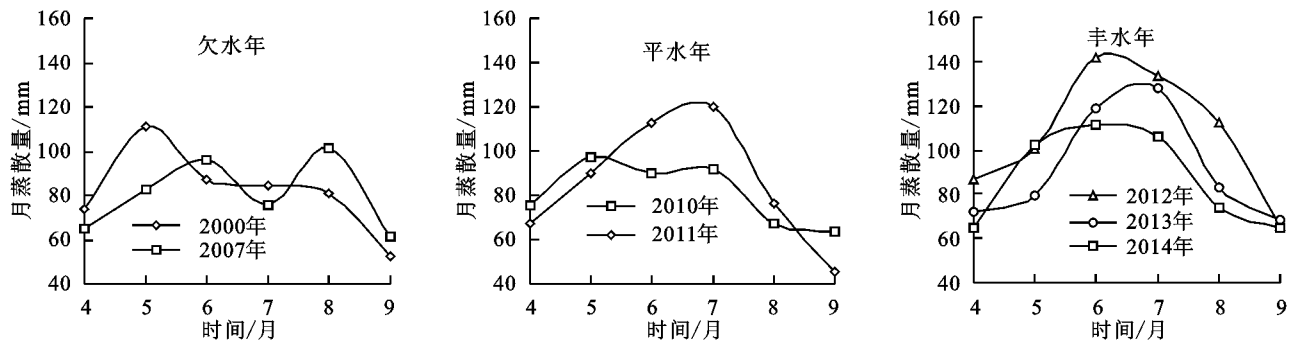


图3 遥感反演锡林河流域4—9月份月蒸散量变化曲线图

将2000—2014年每年7月份蒸散量与月日均气温、风速、大气相对湿度、水汽压和月降水量做单因子相关分析,结果表明,蒸散量与降水量的相关性最大,相关系数为0.860,其次为大气相对湿度(0.854),水汽压(0.811),这3个量均为 $p < 0.01$ 显著正相关,说明水分是影响蒸散量的主要因子。风速和气温与蒸散量均为负相关,其中风速相关系数为 -0.613 ,为 $p < 0.05$ 显著相关。风速的变化是比较复杂的,风速增大的时候,蒸散理应增大,但是当风速的值大于大风($> 1.2 \text{ m/s}$),风速越大,植物由于自我保护特性,气孔的开度变小,反而会降低植物蒸腾的水平^[8],而本研究区月均风速均大于 2 m/s ,远远大于大风标准。蒸散量与气温呈负相关,相关系数为 -0.459 ,由于均为7月份,气温变化不如季节变化明显,均在 22°C 左右,因此这时的气温并不是蒸散的限制因子,而降水极大地影响着蒸散量的大小,降水增加,一般云量也多,导致日照减少,气温降低,而蒸散则会随降水的增加而增加,因此体现出蒸散量与气温的负相关性。

由以上分析可知,不论是蒸散量的年际还是季节动态分析,始终与蒸散量最为相关的气象因子是降水量,说明水分是影响蒸散量大小的主要限制因子;由于气温季节变化明显,因此气温也是影响蒸散量的主要因子,但在每年的同一时间段,气温变化不明显时,气温就不再是影响蒸散量大小的主要因子了。

6 讨论与结论

据《锡林郭勒盟志》^[9]记载,年蒸发量最大值主要出现在5—6月,文中解释为此时气温回升,日照时间长,导致蒸发量最大。本研究得出的结论为蒸散量最大值主要出现在植物生长旺季6—7月,与降雨较多、植物叶面积较大、气温较高均有关。而《锡林郭勒盟志》中蒸发的测定主要为蒸发皿,忽略了自然降水对蒸发的影响这一主要因子,而且不考虑植物的蒸腾作用,因此与本研究结果不尽相同。

本研究选择锡林河流域为研究区,基于地表能量平衡原理,运用遥感方法,结合气象资料,对MODIS影像进行处理及运算,反演出2000年、2007年、2010—2014年每年4—9月蒸散量月值,以及2000—

2014年每年7月份月蒸散量的值。用FAO推荐的Penman-Monteith公式以及作物系数对2012年3月29日—10月6日的日均蒸散量进行了计算,对该时间段的遥感反演结果进行了验证,平均相对误差为16.678%,在20%的误差允许范围之内。

在时间分布上,2000—2014年这15 a每年7月份流域蒸散量的时间变化没有固定的趋向,基本与各年7月份降水量的趋势相一致。一年中蒸散量的最大值主要出现在6—7月份。

将月蒸散量与月日均气温、风速、大气相对湿度、水汽压和月降水量作了单因子相关分析,结果表明,不论是蒸散量的年际还是季节动态分析,始终与蒸散量最为相关的气象因子是降水量,说明降水量是影响蒸散量大小的主要限制因子;由于气温季节变化明显,因此气温也是影响蒸散量的主要因子,但在每年的同一时间段(如7月),气温变化不明显时,气温就不再是影响蒸散量大小的主要因子了。

参考文献:

- [1] 蔡玉林,于慧娜,高宗军,等.大沽河流域蒸散量时空变化[J].遥感信息,2016,31(5):126-132.
- [2] 张圆,郑江华,刘志辉,等.基于Landsat8与GEOEYE-1数据融合的天山北坡县域蒸散量计算:以呼图壁县为例[J].中国沙漠,2016,36(2):508-514.
- [3] 全川,杨景荣,雍伟义,等.锡林河流域草原植被退化空间格局分析[J].自然资源学报,2002,17(5):571-578.
- [4] 白永飞,张丽霞,张焱,等.内蒙古锡林河流域草原群落植物功能群组成沿水热梯度变化的样带研究[J].植物生态学报,2002,26(3):308-316.
- [5] 顾晓鹤,何春阳,潘耀忠,等.基于生态风险评估的锡林河流域退化草地优化管理[J].应用生态学报,2007,18(5):968-976.
- [6] 于红博,包玉海,李和平,王军.锡林河流域蒸散量遥感反演[J].水土保持研究,2014,21(1):224-228.
- [7] 于红博.黄土丘陵沟壑区植物蒸腾和植被蒸散估算尺度转换模型研究[D].呼和浩特:内蒙古大学,2009.
- [8] 王瑞辉,马履一,李丽萍,等.元宝枫树干液流的时空变异性研究[J].北京林业大学学报,2006,28(2):12-18.
- [9] 锡林郭勒盟志编撰委员会.锡林郭勒盟志[M].呼和浩特:内蒙古人民出版社,1996.