

# 锡林河流域蒸散量时空变化遥感监测

于红博<sup>1,2</sup>, 包玉海<sup>1</sup>, 张巧凤<sup>1,2</sup>, 李和平<sup>3</sup>, 王军<sup>3</sup>

(1. 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;

2. 内蒙古师范大学 地理科学学院, 呼和浩特 010022; 3. 中国水利水电科学研究院 牧区水利科学研究所, 呼和浩特 010020)

**摘要:** 研究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—2012 年每年 7 月、2012 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(旬)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: 反演得到的蒸散量分布与地表状况比较吻合, 其中低湿地植被、草甸草原蒸散量较大, 锡林河流域区域的地段形成的湿地植被蒸散量较大, 植被密集的地方如耕地蒸散值较大, 明显高于植被稀疏的地区。在空间分布上均为上游大于中游, 中游大于下游, 与地表植被覆盖相一致。2000—2012 年这 13 a 流域最大蒸散量出现在 2012 年, 最小值出现在 2000 年, 基本与各年 7 月份降水量的趋势相一致, 它们之间的决定因子为 0.755 3; 2012 年 4—9 月份月蒸散量和旬蒸散量随时间的变化基本为一钟形曲线, 反映了植物在整个生长季的蒸散耗水状况。

**关键词:** 锡林河流域; 蒸散量; 遥感

中图分类号: P332.2

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2014)06-0290-05

## Remote Sensing Monitoring of Temporal and Spatial Variation of Evapotranspiration in Xilin River Basin

YU Hong-bo<sup>1,2</sup>, BAO Yu-hai<sup>1</sup>, ZHANG Qiao-feng<sup>1,2</sup>, LI He-ping<sup>3</sup>, WANG Jun<sup>3</sup>

(1. Inner Mongolian Key Laboratory of Remote Sensing and Geography Information System,

Inner Mongolia Normal University, Huhhot 010022, China; 2. College of Geographical Science, Inner Mongolia

Normal University, Huhhot 010022, China; 3. Institute of Water Resources for Pastoral Area, IWHR, Hohhot 010020, China)

**Abstract:** The study area is located in 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 2012 and from Apr. to Sept. 2012, and using auxiliary environmental data from the same periods. Daily evapotranspiration was estimated by scaling. Monthly and ten-day evapotranspiration were 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. The result of evapotranspiration distribution was consistent with land surface conditions. The evapotranspiration of wetland vegetation and meadow grassland was higher. The evapotranspiration of dense vegetation such as farmland was higher than the sparse. With respect to the spatial distribution, the evapotranspiration in the upper reaches was always higher than in the middle and lower reaches. It was consistent with the vegetation cover. The maximum evapotranspiration of thirteen years from 2000 to 2012 appeared in 2012. The minimum value appeared in 2000. The trend of evapotranspiration was consistent with precipitation. And the determinant was 0.755 3. Changes of monthly and ten-day evapotranspiration over time showed a bell-shaped curve, which reflected water consumption of plants throughout the growing season.

**Key words:** Xilin River basin; evapotranspiration; remote sensing

收稿日期: 2013-11-06

修回日期: 2013-12-06

资助项目: 水利部公益性行业科研专项经费项目“牧区灌溉人工草地高效用水技术研究”(201001039); 内蒙古自然科学基金项目(2013MS0611); 内蒙古师范大学基金项目(120196-z)

作者简介: 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

通信作者: 包玉海(1965—), 男(蒙古族), 内蒙古呼和浩特市人, 博士, 教授, 从事遥感与地理信息系统研究。E-mail: baoyuhai@imnu.edu.cn

水循环是全球气候系统中的一个主要部分,在水循环的几个环节中,蒸散占有特别重要的地位,热量的释放和吸收是伴随着蒸散过程同时进行的<sup>[1]</sup>。在中国北方草原,降水稀少,蒸散作为草原生态需水的消耗量,占有重要的地位,近年来随着工业经济、城镇化的快速发展,工业用水增长迅速,人类在将水资源的使用权优先地赋予给灌溉农业、居民生活和工业的同时,忽略和挤占了生态系统用水,水资源供需矛盾日益突出,人们对环境保护和水资源配置问题日益重视,生态用水量研究受到了专家和学者的广泛关注<sup>[2-3]</sup>,蒸散量是草原生态需水的消耗量,清楚地认识蒸散,对于合理利用有限水资源具有重大意义<sup>[1]</sup>。

内蒙古锡林河流域内的天然草地在内蒙古高原具有典型性和代表性,是京津等地区甚至是全国的重要绿色屏障,也是目前我国最大的草原与草甸生态系统类型的自然保护区。该流域拥有丰富的植物种类和植被类型,是联合国教科文组织人与生物圈计划的生物圈保护区之一<sup>[4]</sup>,在草原生物多样性保护和全球变化动态监测等方面占有重要的空间位置和明显的国际影响<sup>[5]</sup>。

本研究选择锡林河流域为研究区,运用遥感方法,结合气象资料,对 2000—2012 年每年的 7 月份、2012 年 4—9 月的影像进行处理,估算出该流域的月(旬)蒸散量,来初步探究锡林河流域蒸散量的空间分布及其时空变化。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 km<sup>2</sup>,总长 175 km<sup>[6-7]</sup>。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<sup>[4]</sup>,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℃<sup>[7]</sup>。

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<sup>[7-8]</sup>;在锡林河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<sup>[2]</sup>。

## 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—2011 年每年 6 月 25 日—8 月 12 日逐日气象数据,包括平均气温、相对湿度、风速、水气压、降水、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 个气象站点数据。

由气象部门提供 2012 年 3 月 29 日—10 月 6 日逐日气象数据,包括平均的气温、大气相对湿度、10 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、林西县、西乌珠穆沁旗、正兰旗、正镶白旗共 8 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 年—2011 年每年 6 月 25 日—8 月 12 日锡林河流域 16 天合成 MODIS 卫星数据,2012 年 3 月 29 日—10 月 6 日锡林河流域 8 天合成 MODIS 卫星数据,该数据经过验证,是 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,地表反射率和太阳天顶角产品 MOD09A1,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,用 Visual Foxpro 进行程序的编写。

### 3 理论及研究方法

本研究主要基于地表能量平衡原理,运用较为成熟的遥感模型陆表面能量平衡算法(Surface Energy Balance Algorithm for Land,SEBAL)估算流域蒸散量,该模型引入了“极干”和“极湿”的概念,运用遥感反演得到的地表特征参数,结合气象数据,估算地表通量,该模型的实用性与可靠性已得到验证,是当今国际上应用较好的模型之一。根据得到的地表通量算出瞬时蒸散量,通过积分运算,时间尺度扩大到日蒸散量,再根据包括该月中的遥感结果按所占日数进行加权得到月蒸散量。具体反演模型见参考文献[9]。

### 4 结果检验

利用 FAO 推荐的估算参考作物蒸散的 Penman

-Monteith 公式对 2012 年 3 月 29 日—10 月 6 日每 8 天的日均蒸散量(共计 23 个时间段)进行计算,参考 FAO56,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。

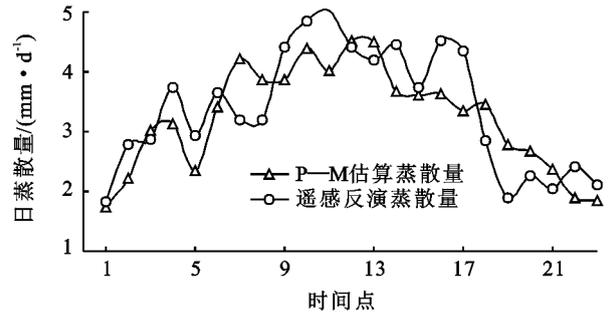


图 1 参考作物蒸散量与遥感反演蒸散量对比

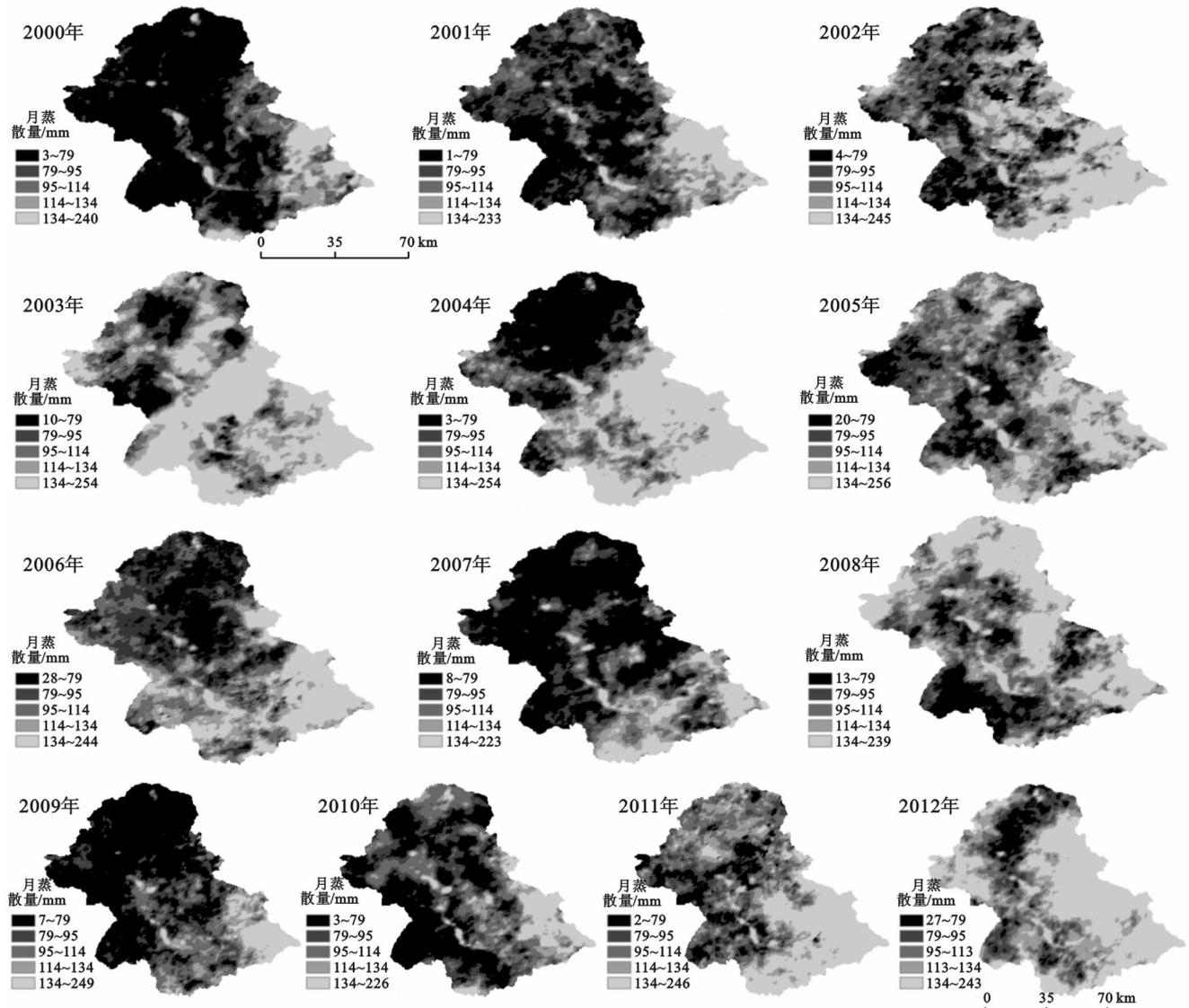


图 2 2000—2012 年每年 7 月锡林河流域月蒸散量

## 5 结果与分析

### 5.1 锡林河流域蒸散量空间变化分析

由于植被类型、自然条件的差异,锡林河流域各地区蒸散量差异较大。锡林河流域走势为东南—西北,上游地区蒸散量高于中下游地区。上游地区土地利用类型较多,有草地、耕地、林地,其中林地、耕地蒸散量较大;上游地区植被类型也较多,主要有草原地带的沙地植被,丛生禾草、根茎禾草典型草原(羊草、大针茅),草甸草原(贝加尔针茅、线叶菊)等,以及河流流经地段上形成的低湿地植被,其中低湿地植被、草甸草原蒸散量较大。中游地区土地利用类型主要为草地、耕地和城乡居民、工矿用地,其中城乡居民、工矿用地蒸散量较小。下游地区植被类型较单一,主要是典型草原(克氏针茅)以及河流流经地段及周边由于盐碱化形成的盐碱地和裸河床,蒸散量较小。

为便于分析 2000—2012 年锡林河流域蒸散量的

变化,采用统一的分类阈值,制作 2000—2012 年每年 7 月锡林河流域月蒸散量分布图,如图 2 所示。由图 2 可知,2000—2012 年这 13 年流域蒸散量的空间变化没有固定的趋向,不论蒸散值大还是小的年份,在空间分布上,基本均为上游大于中游,中游大于下游,与地表植被覆盖相一致。由于蒸散量的大小与降水量极为相关,因此,降水量大的年份,蒸散量也大,蒸散值大的区域所占面积越大,包括流域大部分区域(如 2012 年),降水量小的年份,蒸散量也小,蒸散值大的区域仅出现在上游地区及河流流经地段(主要是低湿地植被,如 2000 年)。

采用统一的分类阈值,制作 2012 年生长季 4—9 月份锡林河流域月蒸散量分布图,如图 3 所示。由图可知,随着 4—6 月份蒸散值逐渐增大,蒸散值大的区域从上游蔓延至中下游,随着 6—9 月份蒸散值逐渐减小,蒸散值小的区域从中下游扩张至上游。流域蒸散量空间分布变化与该流域植被的物候期相一致。

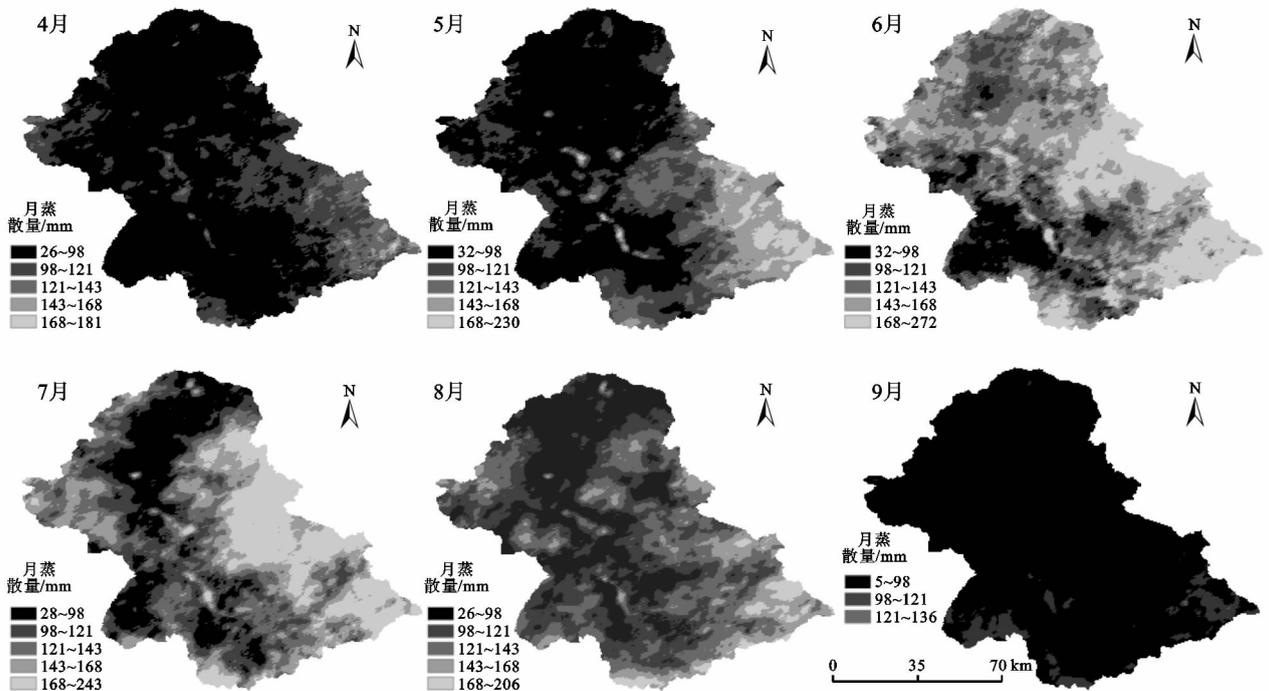


图 3 2012 年 4—9 月锡林河流域月蒸散量

### 5.2 锡林河流域蒸散量时间变化分析

图 4 为反演的锡林河流域 2000—2012 年每年 7 月份蒸散量和降水量变化曲线图,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,最小蒸散量出现在 2000 年,基本与各年 7 月份降水量的趋势相一致。由于蒸散量的变化与降水量表现出很强的一致性,因此分析了它们的散点图(图 5),决定因子为 0.755 3,具有较好的相关性,表明降水是决定蒸散量大小的重要限制因子。

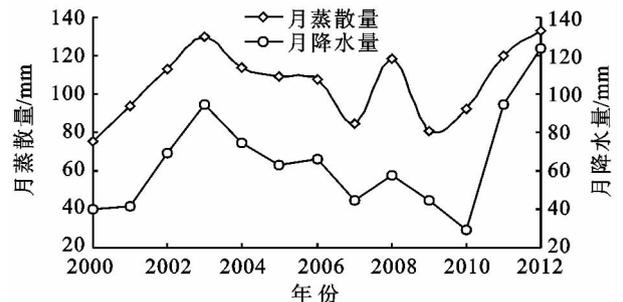


图 4 锡林河流域 2000 年 7 月—2012 年 7 月份月蒸散量与月降水量年际变化

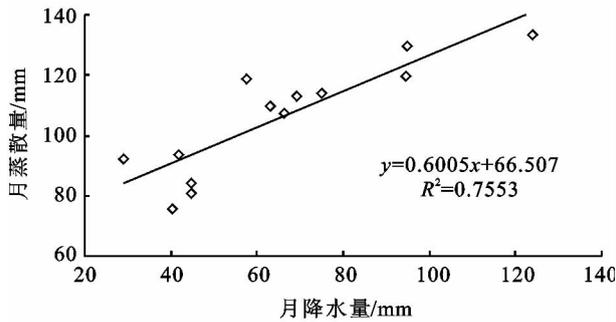


图5 锡林河流域月降水量与月蒸散量散点图

图6为反演的锡林河流域2012年4—9月份月蒸散量变化曲线图,由图可知,曲线基本为一钟形曲线,峰值出现在6月份,曲线从峰值点向两侧逐渐降低。其中5—6月份,曲线上升速度较快,蒸散值由100.87 mm/月达到142.09 mm/月;8—9月份,曲线下落迅速,蒸散值由112.56 mm/月下降到65.65 mm/月。该曲线反映了植物在整个生长季的蒸散耗水状况。

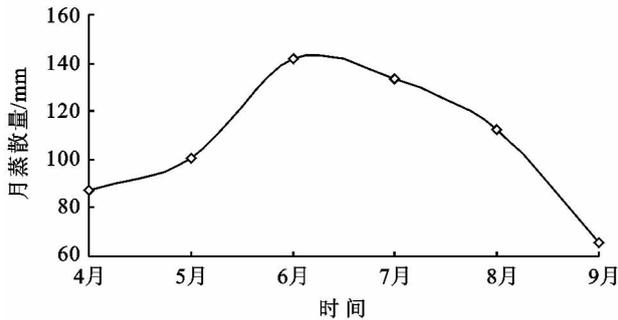


图6 遥感反演锡林河流域2012年4—9月份月蒸散量变化曲线

图7为反演的锡林河流域2012年4—9月份旬蒸散量变化曲线图,由图可知,曲线的整个趋势为向下的抛物线,各旬蒸散值沿该抛物线上下波动,最大值出现在6月下旬,达到49.50 mm,最小值出现在9月中旬,为20.92 mm。

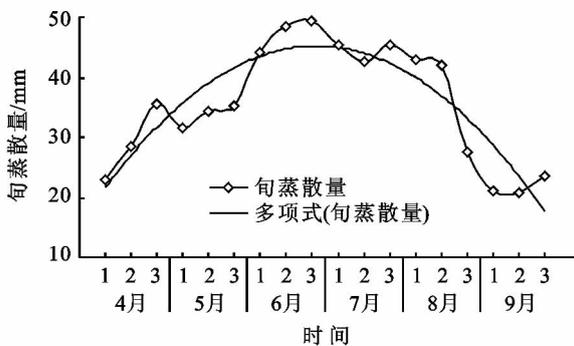


图7 遥感反演锡林河流域2012年4—9月份旬蒸散量变化曲线(1,2,3表示上、中、下旬)

## 6 结论

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2012年4—9月份蒸散量月值和旬值,以及2000—2012年每年7月份月蒸散量的值。用FAO推荐的Penman-Monteith公式对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%,在允许范围之内。

反演得到的日蒸散量分布与地表状况比较吻合,上游地区日蒸散量高于中下游地区,上游地区草甸草原、耕地、林地以及锡林河流经区域的地段形成的低湿地植被蒸散值较大,中游地区城乡居民、工矿用地蒸散量较小,下游地区河流流经地段由于盐碱化形成的裸河床蒸散量较小。

在空间分布上,均为上游大于中游,中游大于下游,与地表植被覆盖相一致。降水量大的年份,蒸散量也大,蒸散值大的区域从上游蔓延至中下游,降水量小的年份,蒸散量也小,蒸散值小的区域从中下游扩张至上游。在时间分布上,2000—2012年这13年流域最大蒸散量出现在2012年,最小值出现在2000年,基本与各年7月份降水量的趋势相一致,它们之间的决定因子为0.7553。锡林河流域2012年4—9月份月蒸散量和旬蒸散量随时间的变化基本为一钟形曲线,峰值分别出现在6月份和6月下旬,反映了植物在整个生长季的蒸散耗水状况。

### 参考文献:

- [1] 刘惊涛,刘世荣. 植被蒸散研究方法的进展与展望[J]. 林业科学,2006,42(6):108-114.
- [2] 刘佳慧,刘芳,王伟,等. “3S”技术在生态用水量研究中的应用:以锡林河流域为例[J]. 干旱区资源与环境,2005,19(4):92-97.
- [3] 宋炳煜,杨劼. 关于生态用水研究的讨论[J]. 自然资源学报,2003,18(5):617-625.
- [4] 肖向明,王义凤,陈佐忠. 内蒙古锡林河流域典型草原初级生产力和土壤有机质的动态及其对气候变化的反应[J]. 植物学报,1996,38(1):45-52.
- [5] 彭皓,李镇清. 锡林河流域天然草地生态系统服务价值评价[J]. 草业学报,2007,16(4):107-115.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 于红博,包玉海,李和平,等. 锡林河流域蒸散量遥感反演[J]. 水土保持研究,2014,21(1):224-228.