

## Characteristic Analysis of Ecological Water Use in Xilin River Basin Based on Remote Sensing

Hongbo Yu<sup>1</sup>, Jie Chen<sup>2\*</sup>, Qiaofeng Zhang<sup>1</sup>

1. College of Geography Science, Inner Mongolia Normal University, Huhhot 010022, China

2. Inner Mongolia Radio and TV Station, Huhhot 010058, China

Received October 27, 2018

Accepted November 15, 2018

### Abstract

Our study area is the Xilin River basin. Remote sensing approach was used to retrieve ecological water use by using MODIS images from Apr. to Sept. of 2000、2007、2010- 2014, and using auxiliary environmental data from the same time periods. The results showed the spatial distribution of ecological water use was consistent with the land surface condition. The ecological water use had the trend of strip reduction from the upstream to the middle and lower reaches. The annual variation was extremely related to the precipitation. Large amount of precipitation in the year, ecological water use was larger, and vice versa. The areas with higher ecological water use were forest land and farmland, followed by unutilized land. Grassland and construction land were lower. The order of ecological water use of different land use type was basically: forest land> farmland>unutilized land>construction land>grassland. In the year of abundant water, the time of the maximum value of ecological water use appeared in June-July with the time of precipitation. In dry year, the time of the maximum value had no rule. The single factor correlation analysis of the monthly ecological water use and monthly meteorological factors showed that the most relevant meteorological factor is precipitation. The correlation coefficient is 0.776.

*Keywords:* Xilin River basin, ecological water use, remote sensing, land use

## 基于遥感的锡林河流域生态用水特征分析

于红博<sup>1</sup>, 陈杰<sup>2\*</sup>, 张巧凤<sup>1</sup>

1. 内蒙古师范大学地理科学学院, 呼和浩特 010022

2. 内蒙古广播电视台, 呼和浩特 010058

**摘要:** 本研究选择锡林河流域为研究区, 利用遥感方法对2000年、2007年、2010年-2014年每年4-9月的MODIS影像数据进行处理, 结合同期气象资料以及实测数据估算流域生长季生态用水量。结果表明, 流域生态用水量空间分布与地表状况比较吻合, 生态用水量基本均为由上游到中下游呈条带状减少的趋势, 年际变化与降水量极为相关, 降水量大的年份, 生态用水量较大, 生态用水量大的区域所占面积越大, 包括流域大部分区域, 反之亦然。生态用水量较高的地类为林地和耕地, 其次为未利用地, 草地和建设用地生态用水较低, 基本为林地>耕地>未利用地>建设用地>草地。在降水充沛的年份, 生态用水最大值主要出现在雨量充沛的6-7月份, 在降水欠缺的年份, 最大值出现的时间没有规律。将月生态用水量与月气象数据进行了单因子相关分析, 表明降水是影响生态用水量大小的主要限制因子, 相关系数为0.776。

**关键词:** 锡林河流域; 生态用水; 遥感; 土地利用

\*通讯作者: 1106275721@qq.com

## 1 引言

锡林河流域位于内蒙古高原中东部,在内蒙古锡林郭勒盟和赤峰市克什克腾旗境内,东缘属于大兴安岭西麓低山丘陵区。该流域内的天然草地是内蒙古高原的典型代表,是京津冀等地区重要的绿色屏障,该流域拥有目前我国最大的草原与草甸生态系统类型的自然保护区,对草原生物多样性保护起到重要作用,在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>[1]</sup>。该流域属于干旱半干旱地区,降水量小,蒸散量大,水量收支不平衡。特别是近年来,煤矿开采频繁,城镇化发展迅速,工业用水增加,人类在将水资源的使用权优先地赋予灌溉农业、工业和居民生活的同时,挤占和剥夺了生态系统用水,水资源供需矛盾十分严峻。如何保护生态环境和合理配置水资源是一个备受关注并需亟待解决的问题,生态用水研究受到了专家和学者的广泛关注<sup>[2-5]</sup>。

“生态用水”一词由汤奇成于 1989 年提出,随着人们对生态环境的日益重视,生态用水问题已引起越来越广泛的关注,成为各级领导、专家学者讨论和研究的热点。“生态用水”其内涵宽泛,尚未有明确统一的定义。许多研究者根据不同的理解,对生态用水概念作出多种不同的界定,其中将蒸散量看作是生态用水占有相当比例。宋炳煜先生于 2003 年指出生态用水是维持各类生态系统正常发育与相对稳定所必需消耗和现存的水分,认为草原植被的生态用水量主要体现在维持草原植被正常发育与相对稳定所消耗(植物蒸腾和土壤蒸发)的水和在现状环境条件下土壤所贮存的水量,因此其数量等于植物蒸腾量以及土壤蒸发量(即植被蒸散量)与土壤贮水量之和<sup>[6]</sup>,本研究采用了该观点。

本研究选择锡林河流域为研究区,运用遥感方法,结合气象资料和实测数据,对 2000

年、2007 年、2010 年-2014 年每年 4-9 月的 MODIS 影像进行处理,估算出该流域的生长季生态用水量,来探究锡林河流域生态用水量的时空变化特征、不同土地利用类型生态用水特性以及自然影响因子。本研究对该流域植被耗水量和生态用水量有定量的了解,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。

## 2 研究区概况

锡林河流域地势由东向西逐渐降低,流域总面积约 10786km<sup>2</sup>,总长 175km。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 400mm 左右,西北部为 250mm 左右,年平均气温则从东南向西北逐渐增加。

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;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<sup>[1][7]</sup>。

## 3 数据来源

### 3.1 气象数据

由中国气象科学数据共享服务网提供的 2000 年、2007 年、2010 年-2014 年每年 3 月 5 日-10 月 15 日逐日气象数据,包括大气相对湿度、平均气温、实际水汽压、2m 高度处风速、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、克什克腾旗、东乌珠穆沁旗、西乌珠穆沁旗、化德、多伦县共 7 个站点的站点数据。

以上气象数据均利用 Kriging 方法进行插值,得到面数据。



图 1 锡林河流域空间位置图

Fig.1. Spatial location map of Xilin River Basin

### 3.2 遥感数据

遥感影像资料为美国 NASA 提供的 2000 年、2007 年、2010 年-2014 年每年 3 月 5 日-10 月 15 日锡林河流域 16 天合成 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,地表反射率和太阳天顶角产品 MOD09A1,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 500m,投影为 Albers Conical Equal Area。

### 3.3 实测数据

野外实测数据为 2013-2014 年 4-9 月份 0-0.5m 深度土壤含水量数据,每个样地三次重复,取平均值,在研究区内共设有 30 个样地。

### 3.4 数据处理软件

用 MRT 软件对 MODIS 影像进行投影转换,用 PCI、Envi 和 arcGIS 软件对 MODIS 影像进行处理、运算、分析和制图,用 Visual Foxpro 6.0 进行部分程序的编写。

## 4 理论及研究方法

根据宋炳煜先生的观点,生态用水量为:生态用水量=植被蒸散量+土壤贮水量。

流域蒸散量主要基于地表能量平衡原理估算<sup>8</sup>:

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

式中,  $R_n$  为地表净辐射通量,  $W/m^2$ ,  $G$  为土壤热通量,  $W/m^2$ ,  $H$  为显热通量,  $W/m^2$ ,  $LE$  为潜热通量,  $W/m^2$ 。

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求和得到月蒸散量。具体方法及公式请参见参考文献[8]。

土壤贮水量根据地表含水量指数 SWCI 进行运算<sup>9</sup>:

$$SWCI = \frac{b_6 - b_7}{b_6 + b_7} \quad (2)$$

式中,  $b_6$ 、 $b_7$  分别为 MODIS 数据的第 6、第 7 波段反射率值。该模型从水的吸收对植被和土壤反射率波谱的综合影响入手,直接获取其地表水分含量指标。计算得到的值用野外实测

数据(0.5m 深度内的土壤含水量)进行了修正。同时根据包括该月中日子的遥感结果按所占日数进行了加权平均得到月土壤贮水量。

由于本文采用地表能量平衡方法和地表含水量指数法估算流域蒸散量和土壤贮水,该方法并不适用于水体,而且所用 MODIS 产品的分辨率为 500m,该流域水体面积小且河流窄,在影像图上基本没有显现,综上两点,本文所研究区域不包括水体。

## 5 蒸散量结果检验

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 8 天的日均蒸散量(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<sup>10</sup>

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T_d + 273.16} u_2 (e_s - e_d)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)} \quad (3)$$

式中,  $ET_0$  为参考作物蒸散量, mm/d;  $R_n$  为作物表面的净辐射通量,  $MJ/(m^2d)$ ;  $G$  为土壤热通量,  $MJ/(m^2d)$ ;  $\Delta$  为饱和水汽压斜率,  $KPa/^\circ C$ ;  $e_s$  为饱和水汽压,  $KPa$ ;  $e_d$  为实际水汽压,  $KPa$ ;  $\gamma$  为干湿球常数,  $KPa/^\circ C$ ;  $u_2$  为 2m 高度处的风速,  $m/s$ ;  $T_d$  为日均温,  $^\circ C$ 。

通过参考作物蒸散量  $ET_0$  和作物系数  $Kc$  可以确定某种作物的实际蒸散量,即

$$ET = Kc ET_0 \quad (4)$$

式中,  $ET$  为作物实际蒸散量, 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 2),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。

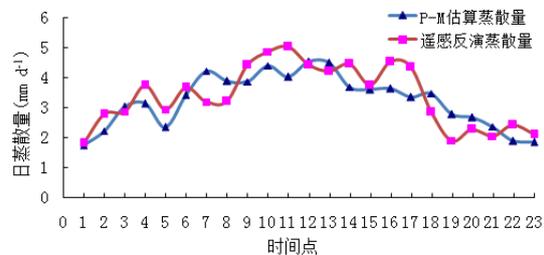


图 2 P-M 估算蒸散量与遥感反演蒸散量对比图  
Fig.2. Contrast diagram of P-M evapotranspiration and evapotranspiration of remote sensing retrieval

## 6 结果分析

### 6.1 锡林河流域生态用水时空分析

为便于比较,采用统一的分类阈值,制作了2000年、2007年、2010-2014年每年生长季(4-9月份)流域总生态用水量(图3)。由于植被类型、自然条件的差异,锡林河流域各地区生态用水量差异较大,其空间分布与地表状况比较吻合,由上游到中下游逐渐减小,与植被覆盖区域、气候条件以及土壤的地带性分布基本一致,由东南到西北呈条带状减少趋势。河流及两侧的低湿地植被、上游地区的草甸草原生态用水量较大;林地、耕地生态用水量大于草地和建设用地;植被密集地带大于稀疏植被的生态用水量。

图4为生长季生态用水和降水随时间的变化曲线图。由图可知,降水充沛年份生长季的生态用水明显高于降水稀少年份生长季的生态用水。生态用水量由蒸散量和土壤贮水量组成,因此与降水量极为相关。由图3和图4可知,降水量大的年份,生态用水量大,生态用水量大的区域所占面积越大,包括流域大部分区域,降水量小的年份,生态用水量也小,生态用水量大的区域仅出现在上游地区及河流流经地段。图5为七年生长季生态用水的直方图,直方图的峰值及主值区间的变化与降水多寡的变化相一致,在降水充沛的年份,峰值与主值区间均向横轴右侧移动。锡林河流域日照和热量充足,能够满足植被生长的光热条件,因此降水量多寡是影响植被长势好坏的主要原因,也是限制生态用水大小的主要气候因子。

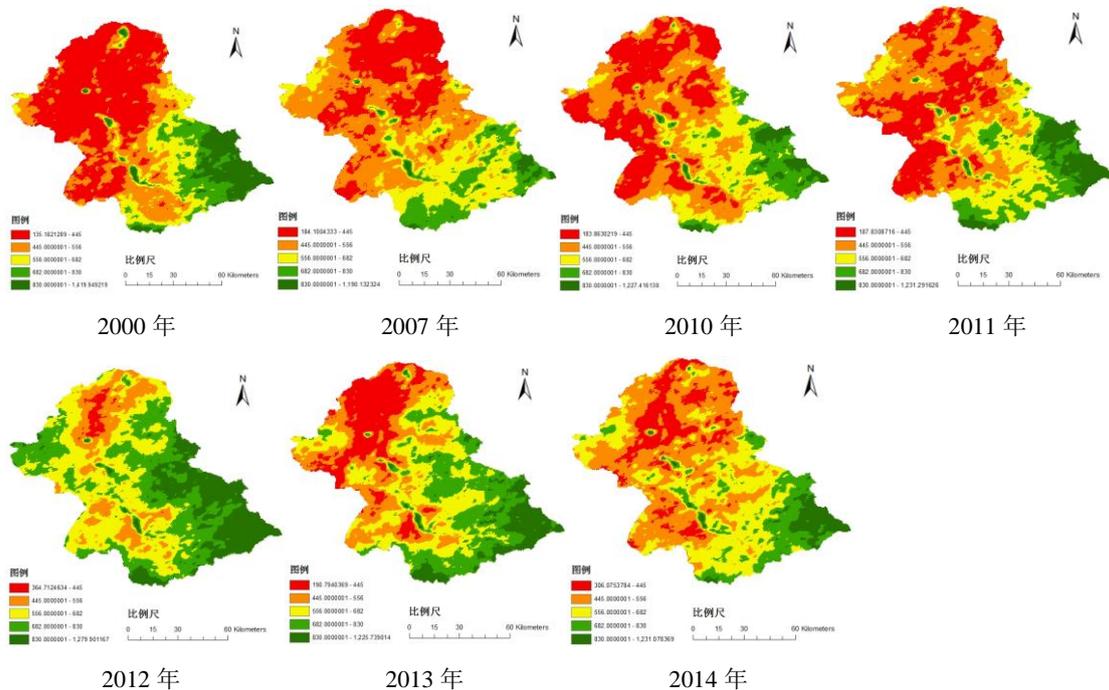


图3 生长季锡林河流域 MODIS 影像反演的月生态用水量(mm/month)

Fig.3. Ecological water use retrieved from MODIS image of XiLin River Basin in growing season

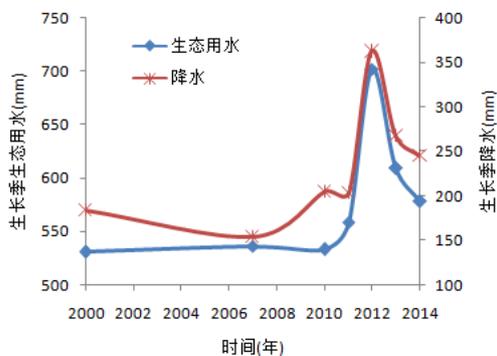


图4 生长季生态用水和降水随时间的变化曲线图  
Fig.4. Ecological water use and precipitation change curve of XiLin River Basin in growing season

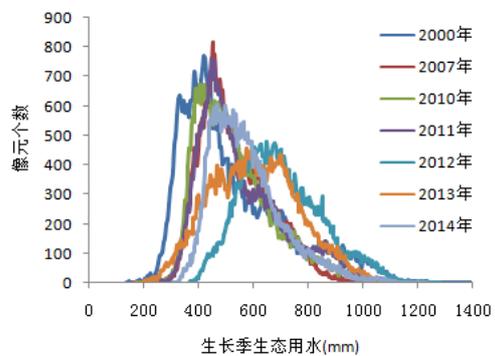


图5 生长季锡林河流域总生态用水量直方图  
Fig.5. Histogram of ecological water use in Xilin River Basin in growing season

### 6.2 不同土地利用类型的生态用水分析

研究区分为6个地类：草地、耕地、林地、未利用地、建设用地和水体。如前所述，本研究不包括水体。

图6为生长季4-9月份锡林河流域不同土地利用类型的生态用水。由图可知，生态用水较高的地类为林地和耕地，其次为未利用地，草地和建设用地生态用水较低，基本为林地>耕地>未利用地>建设用地>草地。林地和耕地为密集型植被，林分内土壤贮水量高，耕地由于灌溉用水的补给，土壤贮水量也较高，此外这两种地类植被覆盖度高，叶面积指数大，植物蒸腾和土壤蒸发较大；未利用地主要为流域

两侧的低湿地植被，由于临近河流，土壤水分较充足，植被蒸散量也较大；草地的生态用水较低，甚至低于建设用地，主要原因一是城镇分布有不少的绿化面积，种植有大量的灌溉树种和观赏植物，蒸腾和蒸发较大，二是整个流域大部分为草地所覆盖，可是草地的类型和覆盖度是不一样的，虽然上游草地植被覆盖度高，蒸散量较大，土壤水分较充足，但所占面积小，中下游草地植被稀疏，蒸散量小，特别是在降水亏缺的年份，出现干旱状态，所以平均下来草地的生态用水较低，但在降水充沛的年份，由于降水补给充足，会出现草地的生态用水与建设用地的生态用水相当的情况。

图7为锡林河流域生长季不同土地利用类型的月生态用水。在降水充沛的年份，有充足的水分对土壤水进行补给，土壤含水量较高，同样有充足的水分可供蒸发蒸腾，蒸散量较大，因此各地类生态用水量均较大，最大值主要出现在雨量充沛的6-7月份。在降水欠缺的年份，土壤含水量低，也没有充足的水分可供蒸散，蒸散量在各个月均相差不大，因此各地类生态用水量较小，变化也较为平缓，最大值出现的时间没有规律。

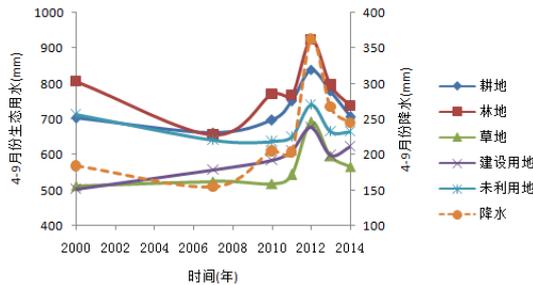


图6 锡林河流域生长季不同土地利用类型的生态用水(mm)

Fig.6. Ecological water use of different land use type in Xilin River basin in growing season

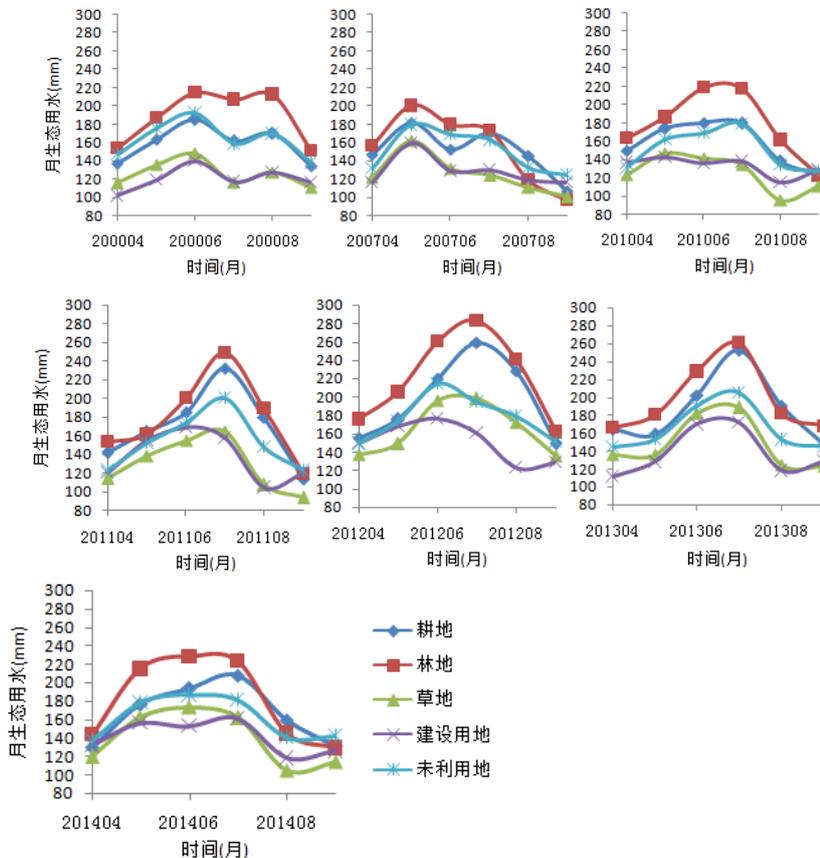


图7 锡林河流域生长季不同土地利用类型的月生态用水(mm)

Fig.7. Monthly ecological water use of different land use type in Xilin River basin in growing season

### 6.3 锡林河流域生态用水与气象因子的关系

图 8 为月生态用水与月降水量散点图，它们之间有良好的线性相关性：

$$\text{月生态用水(mm)} = 0.759 \times \text{月降水(mm)} + 110.3 \quad (R^2 = 0.601)$$

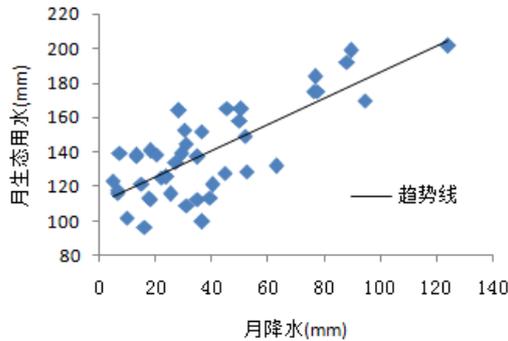


图 8 生态用水与降水散点图

Fig. 8. Scatter diagram of ecological water use and precipitation

七年的月生态用水量与月日均气温、风速、大气相对湿度、水汽压和月降水量的单因子相关分析如表 1 所示，结果表明，生态用水量与降水量的相关性最大，为  $P < 0.1$  显著正相关，其次为水汽压和气温，均为  $P < 0.5$  显著正相关，与风速和大气相对湿度相关性较小，均为正相关。由此可知，水分是影响生态用水量大小的主要限制因子，由于气温季节变化明显，因此气温也是影响生态用水量的重要因子。

表 1 4-9 月份锡林河流域月生态用水量与气象因子之间相关关系

Table 1. Correlation between monthly ecological water use and meteorological factors of XiLin River Basin from Apr. to Sept.

指标	气温	风速	大气相对湿度	水汽压	降水量
相关系数	0.336	0.082	0.253	0.380	0.776

## 7 结论

本研究选择锡林河流域为研究区，对 MODIS 影像进行处理及运算，运用遥感方法反演出 2000 年、2007 年、2010-2014 年每年 4-9 月份生长季的生态用水量。经过分析，结论如下：

流域生态用水量空间分布与地表状况比较吻合，生态用水量基本均为由上游到中下游呈条带状减少的趋势。河流及两侧的低湿地植被、上游地区的草甸草原生态用水量较大；林地、耕地生态用水量大于草地和建设用地；植被密集地带大于稀疏植被的生态用水量。年际

变化与降水量极为相关，降水量大的年份，生态用水量大，生态用水量大的区域所占面积较大，包括流域大部分区域，反之亦然。

生态用水较高的地类为林地和耕地，其次为未利用地，草地和建设用地生态用水较低，基本为林地 > 耕地 > 未利用地 > 建设用地 > 草地。

在降水充沛的年份，生态用水最大值主要出现在雨量充沛的 6-7 月份，在降水欠缺的年份，最大值出现的时间没有规律。

将月生态用水量与月气象数据进行了单因子相关分析，表明降水是影响生态用水量大小的主要限制因子，相关系数为 0.776，它们之间具有良好的线性相关。

## 致谢

国家自然科学基金项目(41661009)；内蒙古自治区自然科学基金(2017MS0408)；内蒙古自治区高等学校科研项目(NJZY17047)

## 参考文献

- [1] P. Hao and L. Zhen Qing, Evaluation of grassland ecosystem services in Xilin River basin, ACTA PRATA CULTURAE SINICA. 16(4) (2007) 107-115.  
彭皓,李镇清,锡林河流域天然草地生态系统服务价值评价,草业学报.16(4)(2007)107-115.
- [2] W. Yu Juan, W. Shu Dong, Y. Sheng Tian, et al, Dynamic Simulation of Vegetation Eco-water of the Yellow River Basin, JOURNAL OF NATURAL RESOURCES. 29(3) (2014) 431-440.  
王玉娟,王树东,杨胜天,等,黄河流域植被生态用水过程动态模拟,自然资源学报. 29(3) (2014) 431-440.
- [3] H. Ge Sheng, On Improvement of Ensuring System concerning Eco-environmental Water-Use in China, Hebei Law Science. 34(7) (2016) 16-29.  
胡德胜,论我国生态用水保障制度的完善,河北法学. 34(7)(2016)16-29.
- [4] P. Xingyao, L. Honglu, L. Fahu, et al, Ecological water requirement of irrigated region in Tongzhou District of Beijing based on GIS technique, Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering. 23(2) (2007) 42-47.  
潘兴瑶,刘洪禄,李法虎,等,基于 GIS 技术的北京通州区灌区生态需水研究,农业工程学报.23(2)(2007) 42-47.
- [5] C. Chao, P. Xuebiao, Z. Lizhen, et al, Impact of climate change on cotton production and water consumption in Shiyang River Basin, Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering. 27(1) (2011) 57-65.  
陈超,潘学标,张立祯,等,气候变化对石羊河流域棉花生产和耗水的影响,农业工程学报.27(1)(2011) 57-65.

- [6] S. Bing Yu and Y. Jie, Discussion on ecological use of water research, *Journal Of Natural Resources*. 18(5) (2003) 617 -625.  
宋炳煜,杨劫,关于生态用水研究的讨论, *自然资源学报*.18(5)(2003)617-625.
- [7] G. Xiao He, H. Chun Yang, P. Yao Zhong, et al, Optimizing management on degraded grassland in Xilin River Basin based on ecological risk assessment, *Chinese Journal of Applied Ecology*. 18(5) (2007) 968-976.  
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, *应用生态学报*.18(5) (2007)968-976.
- [8] Y. Hong Bo, B. Yu Hai, L. He Ping, et al, Remote Sensing Retrieval of Evapotranspiration in Xilin River Watershed, *Research of Soil and Water Conservation*. 21(1) (2014) 224-228.  
于红博,包玉海,李和平,等,锡林河流域蒸散量遥感反演, *水土保持研究*.21(1)(2014)224-228.
- [9] D. Xiao, W. Shi Xin, Z. Yi, et al, A Digital Image Watermarking Algorithm Based on Quadtree and Error Correcting Code, *Geomatics and Information Science of Wuhan University*. 32(3) (2007) 205-207, 211.  
杜晓,王世新,周艺,等,一种新的基于 MODIS 的地表含水量模型构造与验证, *武汉大学学报(信息科学版)*.32(3)(2007)205-207,211.
- [10] Y. Hong Bo, Evapotranspiration Estimated by a Scaling Model in the Ordos Plateau, China, PhD thesis, Huhhot: Inner Mongolia University, (2009), pp.26-28.  
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, *内蒙古大学博士学位论文*, 内蒙古大学,2009,26-28.