

锡林郭勒草原蒸散发月季动态及相关因子分析

张巧凤^{1,2,3,4}, 刘桂香², 于红博^{1,3}, 玉山^{1,3}, 包玉海^{1,3}

(1. 内蒙古师范大学 地理科学学院, 呼和浩特 010022; 2. 中国农业科学院草原研究所, 呼和浩特 010010; 3. 内蒙古自治区遥感与地理信息系统重点实验室, 呼和浩特 010022; 4. 内蒙古防灾减灾与生态安全监测实验室, 呼和浩特 010022)

摘要: 蒸散发(Evapotranspiration, ET)的时空动态对理解水热对植被的影响具有重要作用。利用 MODIS MOD16 A2 和 MOD13 A3 月产品数据及气象数据,通过回归分析和相关分析等方法,研究了锡林郭勒草原不同类型草地近 15 年(2000—2014 年)的 ET 月季动态及相关因子。结果表明:3—10 月的 ET 均表现出草甸草原>典型草原和沙地植被>荒漠草原,1—2 月和 11—12 月的 ET 均表现出草甸草原<典型草原和沙地植被<荒漠草原。荒漠草原 11 月 ET 最大,其余各类草原均在 7 月达到最大值;各类草原的最小 ET 均为 5 月。各类草原 3—5 月和 10 月的 ET 均为下降趋势,而 1 月、6 月、7 月和 12 月的 ET 均为上升趋势。春季、夏季和秋季的 ET 均表现出草甸草原>典型草原和沙地植被>荒漠草原,而冬季的 ET 表现出草甸草原<典型草原和沙地植被<荒漠草原。荒漠草原冬季 ET 最大,其余各类草原的 ET 均在夏季达到最大值。各类草原春季和秋季的 ET 均为下降趋势,而夏季和冬季的 ET 均为上升趋势。Pearson 相关分析表明 3—10 月及春季、夏季和秋季的 ET 与 NDVI 和降水量显著正相关,与平均气温显著负相关($p < 0.05$);相反,1—2 月、11—12 月及冬季的 ET 与降水量负相关,而与平均气温显著正相关($p < 0.05$)。

关键词: 锡林郭勒草原; 蒸散发; 植被指数; 气象要素; 相关分析

中图分类号:S812

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2017)03-0164-06

Monthly and Seasonal Dynamics of ET in Xilingol Steppe and Related Factors Analysis

ZHANG Qiaofeng^{1,2,3,4}, LIU Guixiang², YU Hongbo^{1,3}, YU Shan^{1,3}, BAO Yuhai^{1,3}

(1. College of Geographical Science, Inner Mongolia Normal University, Hohhot 010022, China; 2. Institute of Grassland Research of Chinese Academy of Agricultural Sciences, Hohhot 010010, China; 3. Inner Mongolia

Key Laboratory of Remote Sensing and Geography Information System, Hohhot 010022, China; 4. Inner

Mongolia Laboratory of Disaster Prevention and Reduction and Ecological Safety Monitoring, Hohhot 010022, China)

Abstract: Spatiotemporal dynamic of evapotranspiration (ET) plays an important role in understanding the impact of water and heat on vegetation. In the present study, MODIS MOD16A2 and MOD13A3 monthly data and meteorological data were employed to analyze the spatiotemporal dynamics of monthly and seasonal ET in different types of grasslands in recent 15 years (from 2000 to 2014) in Xilingol steppe and the correlation between ET and related factors by means of regression analysis and correlation analysis. The results showed that ET decreased from east to west in Xilingol steppe and in the sequence: meadow steppe>typical steppe and sandy vegetation>desert steppe from March to October. In contrast, ET increased from east to west in Xilingol steppe and in the order: meadow steppe<typical steppe and sandy vegetation<desert steppe in January, February, November and December. The max ET appeared in November in desert steppe, but it reached the maximum value in July in other types of grasslands. The min ET all appeared in May in different types of grasslands. In all types of grasslands, ET had the decreasing trend from March to May, and October, but in January, June, July and December, it had the increasing trend, but all the changes were not significant. In spring, summer and autumn, ET decreased from east to west with meadow steppe>typical steppe and sandy vegetation>desert steppe. In contrast, ET increased from east to west with meadow steppe<typical steppe and sandy vegetation<desert steppe in winter. The max ET appeared in winter in desert

收稿日期:2016-10-01

修回日期:2016-10-18

资助项目: 中国农业科学院创新工程“草原非生物灾害防灾减灾团队”(CAAS-ASTIP-IGR2015-04); 国家科技支撑计划子课题(2013BAK05B01); 国家自然科学基金(71263033); 内蒙古科技计划项目“阿尔山森林火灾监测预警与应急管理系统研究”

第一作者: 张巧凤(1978—), 女, 内蒙古土左旗人, 讲师, 博士, 主要从事 3S 应用和草原生态环境监测与风险评估研究。E-mail: zqf2099@163.com

通信作者: 刘桂香(1962—), 女, 内蒙古乌兰察布人, 研究员, 博士, 主要从事草原生态环境监测评价和草原非生物灾害监测评估研究。

E-mail: liugx804@163.com

steppe, but it reached the maximum value in summer in other types of grasslands. In all types of grasslands, ET had the decreasing trend in spring and autumn, but in summer and winter, it had the increasing trend, but all the changes were not significant. Pearson correlation analysis indicated that there was significant positive correlation ($p < 0.05$) between ET and NDVI and precipitation from March to October and in spring, summer and autumn. On the contrary, in January, February, November, December and in winter, there was no significant negative correlation between ET and precipitation, but significant positive correlation ($p < 0.05$) between ET and mean temperature appeared.

Keywords: Xilingol grassland; ET; NDVI; meteorological factors; correlation analysis

锡林郭勒草原是干旱半干旱温带草原的典型区,草原面积巨大,草地类型多样,饲用植物资源丰富,是我国北方地区重要的生态屏障和畜牧业生产基地之一。20世纪50年代以来,由于气候变化和人类活动的影响导致草地退化严重^[1-3],锡林郭勒草原的生态环境变化及对气候变化的响应一直是众多专家学者关注和研究的热点^[4-6],利用遥感数据的研究主要集中在以NDVI为基础的植被覆盖度、草原面积和产草量估算等方面^[7-10],研究表明,NDVI主要受降水量影响,二者正相关系数高达0.83以上,降水作为该区间的主要水分补给源对植被的生长至关重要^[11-12],而蒸散发(Evapotranspiration, ET)作为地表能量平衡和水量平衡的分量,全球陆地大约60%的降水都会以ET的形式返回到大气中^[13],也是该区水分流失的主要途径。ET过程的同时消耗大约60%的地表净辐射能量^[14],伴随的潜热具有降温作用,ET也可以影响降水,是气候系统中的核心过程和连接水热循环的纽带^[15]。因此,清楚地认识ET的时空动态,对理解水热对草地生态系统的影响具有重要意义。

目前,遥感技术被认为是区域尺度上估算ET最可行的方法^[16-17],具有较好的时效性和区域性特点。美国航空航天局(NASA)的MODIS全球ET产品MOD16,提供了较高时空分辨率的ET数据集,已在国内得到了较为广泛的应用^[18-20],但在锡林郭勒草原的应用较少。本文在前期年尺度ET动态研究的基础上^[21],利用MOD16A2月尺度(1—12月)数据,计算相应季尺度ET,结合同期的气象数据和生长季NDVI,研究锡林郭勒草原不同类型草地近15a(2000—2014年)月季尺度的ET时空动态,以及ET与NDVI和水热因子的相关性,以期为更好地理解该区的水热分配对植被的影响提供科学依据。

1 研究地区与数据来源

1.1 研究区概况

锡林郭勒草原位于中国北方的内蒙古自治区中部,111°09′—120°01′E,41°35′—46°46′N。地势北低南高,东、南部为大兴安岭和阴山山脉延伸余脉的交错地段,西、北部地势较平坦,为高原草地。锡林郭勒

草原属于中温带干旱半干旱大陆性气候;年平均气温0~4℃,最高气温在7月份,平均为22℃;年降水量200~360mm,由东南向西北递减,降水量主要集中在6—9月;年日照时数为2800~3200h,4—9月太阳辐射约占全年的60%左右;该研究区生长季气温适宜,光照充足,是中国北方重要的生态屏障和畜牧业生产基地,也是我国最大的草原生态系统类型的自然保护区。根据1:100万内蒙古自治区植被类型图矢量化结果,锡林郭勒草原植被类型主要分为四大类,即草甸草原、典型草原、荒漠草原和沙地植被^[11-12,22-23]。

1.2 数据来源与处理

MODIS遥感数据来源于美国航空航天局(NASA),时间跨度为2000—2014年,数据产品为MOD16A2(ET)和MOD13A3(NDVI),时间分辨率均为月尺度(1—12月),空间分辨率均为1km。气象数据来源于中国气象科学数据共享服务网和内蒙古气象局,锡林郭勒盟界内共15个地面气象站2000—2014年的月尺度(1—12月)平均气温和降水量。

利用MRT(MODISRe-projectionTools)对遥感数据进行格式和投影转换,把HDF格式转换为TIFF格式,将SIN地图投影转为WGS84椭球的AlbersEqualArea投影,同时完成影像的拼接。用3—5月、6—8月、9—11月、12月至翌年2月分别表示春季、夏季、秋季和冬季,季尺度ET用相应各月的ET求和,生长季(3—11月)尺度NDVI用相应各月的NDVI求平均,季尺度气象数据用相应各月的数据计算。利用锡林郭勒盟界线和各类草原类型界线裁剪各尺度的ET和NDVI影像,利用气象站点提取影像对应位置的ET值和NDVI值。在此基础上分析月季季节尺度的ET动态及其与NDVI和水热因子的相关性。

用Envi 4.7, ArcGIS 10.1和Excel 2007处理数据和制图, SAS 9.1进行相关分析和显著性检验, α 均为0.05水平, $p < 0.05$ 为显著, $p > 0.05$ 为不显著。

2 结果与分析

2.1 锡林郭勒草原ET月动态分析

锡林郭勒草原近15a各月平均ET(附图5)表明,3—10月由东北部和东南延线向西南部递减,东

北部(草甸草原)最大、中部大部分地区(典型草原和沙地植被)次之,而西南部(荒漠草原)ET 最小;11 月—翌年 2 月由东北部向西南部递增,东北部(草甸草原)最小、中部大部分地区(典型草原和沙地植被)次之,而西南部(荒漠草原)ET 最大。

3—10 月的 ET 均表现出草甸草原>典型草原和沙地植被>荒漠草原,1 月、2 月、11 月和 12 月的 ET 均表现出草甸草原<典型草原和沙地植被<荒漠草原,锡林郭勒草原各月的 ET 均与典型草原和沙地植被接近(表 1),*t* 检验表明,典型草原、沙地植被和锡林郭勒草原的 ET 没有显著差异($p>0.05$)。

锡林郭勒草原 1—12 月的 ET 在 10.37~30.28 mm 之间变化,各月平均为 18.19 mm,7 月 ET 最高、其次为 8 月,5 月最低、其次为 4 月,6 月最接近各月平均值。草甸草原 1—12 月的 ET 在 11.68~50.94 mm 之间变化,各月平均为 22.69 mm,7 月 ET 最高、其次为 8 月,5 月最低、其次为 1 月,3 月最接近各月平均值。典型草原 1—12 月的 ET 在 9.94~26.92 mm 之间变化,各月平均 17.57 mm,7 月 ET 最高、其次为 8 月,5 月最低、其次为 4 月,2 月最接近各月平均值。沙地植被 1—12 月的 ET 在 10.09~23.14 mm 之间变化,各月平均 17.14 mm,7 月 ET 最高、

其次为 8 月,5 月最低、其次为 4 月,12 月最接近各月平均值。荒漠草原 1—12 月的 ET 在 5.54~21.64 mm 之间变化,各月平均为 12.09 mm,11 月 ET 最高、其次为 2 月,5 月最低、其次为 6 月,10 月最接近各月平均值(表 1)。近 15 a 各类草原各月的 ET 均为波动变化趋势,将各月的 ET 平均值与年份进行线性回归分析表明其变化趋势均未达到显著水平($p>0.05$)(表 2)。

表 1 2000—2014 年各类草原各月 ET 的平均值

月份	草甸草原	典型草原	沙地植被	荒漠草原	锡林郭勒草原
1	13.63	14.29	15.41	17.32	14.21
2	15.19	18.03	18.84	19.33	17.60
3	22.99	21.47	20.44	16.22	20.98
4	14.36	11.62	11.55	6.82	11.69
5	11.68	9.94	10.09	5.54	10.37
6	29.74	16.93	16.00	6.23	18.85
7	50.94	26.92	23.14	6.55	30.28
8	43.98	24.89	22.19	7.29	27.42
9	17.85	12.89	12.94	6.76	13.44
10	17.52	16.05	16.16	12.22	15.93
11	20.77	21.62	21.52	21.64	21.42
12	13.57	16.23	17.41	19.20	16.14
平均	22.69	17.57	17.14	12.09	18.19

表 2 各类草原各月 ET 的变化趋势

类型	1 月	2 月	3 月	4 月	5 月	6 月	7 月	8 月	9 月	10 月	11 月	12 月
草甸草原	上升	上升	下降	下降	下降	上升	上升	上升	上升	下降	上升	上升
典型草原	上升	上升	下降	下降	下降	上升	上升	上升	上升	下降	下降	上升
荒漠草原	上升	下降	下降	下降	下降	上升	上升	下降	上升	下降	上升	上升
沙地植被	上升	上升	下降	下降	下降	上升	上升	下降	下降	下降	下降	上升
锡林郭勒草原	上升	上升	下降	下降	下降	上升	上升	上升	上升	下降	下降	上升

总体而言,近 15 a 锡林郭勒草原、草甸草原、典型草原和沙地植被的 ET 均在 7 月达到最大值、其次为 8 月;而荒漠草原 1 月、2 月、11 月和 12 月的 ET 均比其他各月的 ET 大,且 11 月 ET 最大、其次为 2 月;各类草原的最小 ET 均出现在 5 月。近 15 a 各类草原 3—5 月和 10 月的 ET 均为下降趋势,而 1 月、6 月、7 月和 12 月的 ET 均为上升趋势。

2.2 锡林郭勒草原 ET 季节动态分析

近 15 a 各季平均 ET 的空间分布(附图 6)表明,春季、夏季和秋季的 ET 由东北部向西南部递减,夏季明显表现为东北部(草甸草原)最大、中部大部分地区(典型草原和沙地植被)次之,而西南部(荒漠草原)ET 最小;春季和秋季明显表现为东部大于西部,东部大部分地区的 ET 为 40~80 mm,而西部的 ET 则小于 40 mm;冬季 ET 则由东北部向西南部递增,东部草甸草原区的 ET 小于 40 mm,西部大部分地区的 ET40~80 mm。

各类草原各季的 ET 均表现为相近的波动变化趋势,除沙地植被在 2003 年春季和 2010 年秋季 ET 较大外,其余春季、夏季和秋季的 ET 均表现为草甸草原>典型草原和沙地植被>荒漠草原;冬季的 ET 为荒漠草原>典型草原和沙地植被>草甸草原;四个季节中整个锡林郭勒草原的 ET 均与典型草原和沙地植被的 ET 接近(图 1)。

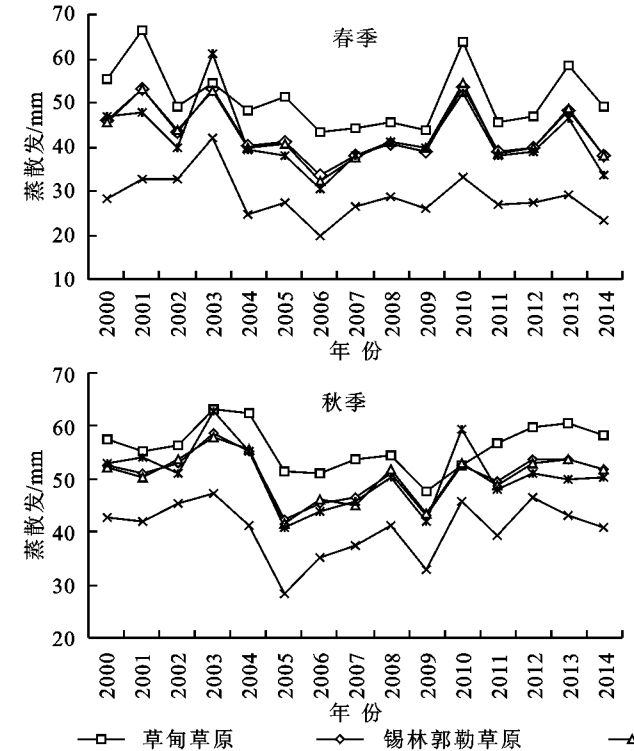
春季,草甸草原的 ET 在 50 mm 上下波动,平均 51.02 mm;典型草原、沙地植被及整个锡林郭勒草原的 ET 在 40 mm 上下波动,平均 ET 分别为 43.02 mm,42.07 mm 和 43.04 mm;荒漠草原在 30 mm 上下波动,平均为 28.58 mm。各类草原的波动变化趋势相近,均在 2001 年、2003 年、2010 年和 2013 年呈现明显的波峰,而在 2002 年、2006 年、2009 年呈现明显的波谷(图 1)。线性回归分析表明,各类草原的 ET 均呈波动下降趋势($p>0.05$)。

夏季,草甸草原的 ET 在 120 mm 上下波动,平

均 124.86 mm;典型草原、沙地植被及整个锡林郭勒草原的 ET 在 60 mm 上下波动,平均 ET 分别为 68.70 mm,61.22 mm 和 76.52 mm;荒漠草原在 20 mm 上下波动,平均为 20.07 mm。各类草原的波动变化趋势相近,均在 2003 年、2008 年和 2012 年呈现明显的波峰,而在 2007 年和 2009 年呈现明显的波谷(图 1)。线性回归分析表明,各类草原的 ET 均呈波动上升趋势($p>0.05$)。

秋季,草甸草原的 ET 在 60 mm 上下波动,平均 56.02 mm;典型草原、沙地植被及整个锡林郭勒草原的 ET 在 50 mm 上下波动,平均 ET 分别为 50.53 mm,50.53 mm 和 50.68 mm;荒漠草原在 40 mm 上下波动,平均为 40.61 mm。各类草原的波动变化趋势相近,均在 2003 年和 2008 年呈现明显的波峰,而在 2005 年和 2007 年呈现明显的波谷(图 1)。线性回归分析表明,各类草原的 ET 均呈波动下降趋势($p>0.05$)。

冬季,草甸草原的 ET 在 40 mm 上下波动,平均 40.52 mm;典型草原、沙地植被及整个锡林郭勒草原的 ET 在 50 mm 上下波动,平均 ET 分别为 48.83 mm,52.19 mm 和 48.19 mm;荒漠草原在 55 mm 上下波动,平均 56.00 mm。各类草原的波动变化趋势相同,均在 2001 年和 2003 年呈现明显的大波峰、2006 年和 2011 年呈现小波峰,而在 2002 年和 2012 年呈现明显的大波谷、2004 年和 2010 年呈现小波谷(图 1)。线性回归分析表明,各类草原的 ET 均呈波动上升趋势($p>0.05$)。



总体而言,锡林郭勒草原的平均 ET 表现为夏季>秋季>冬季>春季,分别占全年 ET 的 35%,23%,22%和 20%;草甸草原的平均 ET 表现为夏季>秋季>春季>冬季,分别占全年 ET 的 46%,20%,19%和 15%;典型草原的平均 ET 表现为夏季>秋季>冬季>春季,分别占全年 ET 的 33%,24%,23%和 20%;沙地植被的平均 ET 表现为夏季>冬季和秋季>春季,分别占全年 ET 的 30%,25%,25%和 20%;荒漠草原的平均 ET 表现为冬季>秋季>春季>夏季,分别占全年 ET 的 39%,28%,20%和 14%。

2.3 锡林郭勒草原 ET 与 NDVI 和水热因子的相关性分析

利用锡林郭勒盟界内的 15 个气象站点,提取 2000—2014 年每年月季尺度的 ET 和生长季 NDVI 值,结合相应月季尺度的气象数据,形成 225 个样本的相关分析数据集,通过 Pearson 相关分析表明 3—10 月及春季、夏季和秋季的 ET 与 NDVI 和降水量均为显著正相关($p<0.05$),而与平均气温均为显著负相关($p<0.05$),说明 3—10 月及春季、夏季和秋季的 NDVI 和降水量越大 ET 越高,而平均气温越高 ET 越小。相反,1—2 月、11—12 月及冬季的 ET 与降水量显著负相关($p<0.05$),而与平均气温显著正相关($p<0.05$)且相关系数较高,说明 1—2 月、11—12 月及冬季的降水量越大 ET 越小,而平均气温越高 ET 越大(表 3)。

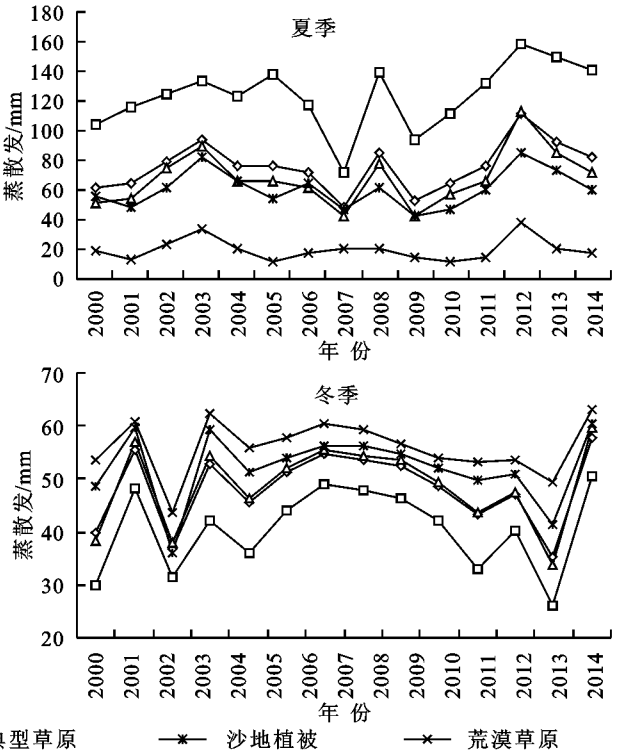


图 1 四季各类草原的 ET 变化

表 3 ET 与 NDVI 和水热的月季相关系数

相关系数	1 月	2 月	3 月	4 月	5 月	6 月	7 月	8 月	9 月	10 月	11 月	12 月	春	夏	秋	冬
NDVI	—	—	0.38*	0.51*	0.65*	0.76*	0.83*	0.82*	0.68*	0.52*	—	—	0.62*	0.84*	0.48*	—
降水量	-0.45*	-0.00	0.35*	0.48*	0.69*	0.58*	0.57*	0.43*	0.55*	0.50*	-0.22*	-0.45*	0.60*	0.67*	0.51*	-0.48*
平均气温	0.75*	0.54±0.65*	-0.53*	-0.47*	-0.76*	-0.76*	-0.73*	-0.52*	-0.62*	0.21*	0.82*	-0.59*	-0.79*	-0.39*	0.78*	

注：* $p<0.05$ 。

3 讨论与结论

本研究表明,近 15 a 锡林郭勒草原 3—10 月及春季、夏季和秋季的 ET 均表现出草甸草原>典型草原和沙地植被>荒漠草原,而 1—2 月和 11—12 月及冬季的 ET 均表现出草甸草原<典型草原和沙地植被<荒漠草原的规律。这与相关文献^[22-23]记录的蒸发量由东向西递增的变化趋势不尽相同,尤其是草原植被的主要生长季 3—10 月的 ET 与文献记录相反,作者在文章^[21]中详细分析了锡林郭勒草原年蒸散发量与文献记录相反的可能原因。另外,本文通过进一步分析其相关因子可知,3—10 月及春季、夏季和秋季的 ET 与 NDVI 和降水量显著正相关,与平均气温显著负相关;相反,1—2 月、11—12 月及冬季的 ET 与降水量负相关,而与平均气温显著正相关,其中 NDVI 或植被覆盖度越大 ET 越高的规律与相关文献一致^[24-29],ET 与 NDVI 显著正相关的结论与宋文献^[27]和倪猛^[29]等的研究结果一致。

气候条件决定了锡林郭勒草原的降水量由东向西逐渐减少,而平均气温由东向西逐渐增加;锡林郭勒草原生长季 NDVI 或植被覆盖度的变化趋势为草甸草原>典型草原和沙地植被>荒漠草原^[11-12],即生长季植被长势由东向西递减。因此,导致生长季(春季、夏季、秋季及 3—10 月)和冬季(1—2 月、11—12 月)蒸散发空间变化趋势相反的原因可能是:

(1) 生长季(春季、夏季、秋季及 3—10 月)蒸散发量主要是植物的蒸腾作用贡献大,降水量越大、植被长势越好 NDVI 值越高、植物蒸腾量越高,降水量大和植物蒸腾量高导致气温相对降低,所以生长季蒸散发和平均气温呈负相关;因此生长季(春季、夏季、秋季及 3—10 月)的蒸散发量由东向西递减。

(2) 冬季(1—2 月、11—12 月)锡林郭勒草原植被枯萎、植物蒸腾基本停止;冬季的降水是以降雪的形式出现,因此冬季的蒸散发量主要是土壤蒸发和雪的蒸发;由于冬季气温较低,降雪基本以固态的形式覆盖地面,雪对地面的覆盖阻碍了土壤的蒸发,积雪越厚土壤蒸发越小;锡林郭勒草原冬季降雪由东向西递减,西部降雪对土壤的覆盖度相对低于东部,因此西部土壤蒸发的可能性大于东部;西南部气温高东北部气温低,气温越高积雪由固态变为气态的量越大,冬季气温和蒸散发呈显著正相关;因此冬季(1—2 月、11—12 月)的蒸散发

由东向西递增。由以上分析可以推断,锡林郭勒草原西部年降水量低于东部,西部冬季蒸发量大于东部,是导致西部荒漠草原生长季植被缺水干旱的主要原因。

本研究表明,锡林郭勒草原、草甸草原、典型草原和沙地植被的 ET 均在 7 月及夏季达到最大值,而荒漠草原 11 月及冬季最大;各类草原的最小 ET 均为 5 月。各类草原 3—5 月和 10 月及春季和秋季的 ET 均为下降趋势,而 6—7 月和 12 月至翌年 1 月及夏季和冬季的 ET 均为上升趋势,但变化趋势均不显著($p>0.05$)。

锡林郭勒草原属于干旱半干旱气候区,降水作为该区的主要水分补给源对植被的生长至关重要,而 ET 作为该区水分流失的主要途径,其时空动态对植被的生长具有重要意义。对降水量本来就很低的荒漠草原而言,其 1—2 月、11—12 月及冬季的 ET 大于 3—10 月的植被生长季,冬季水分流失较多会进一步加剧春季干旱,对春季植被的返青和正常生长不利。3—5 月尤其 5 月是锡林郭勒草原返青的重要时期,而各类草原 3—5 月的 ET 均为下降趋势且以 5 月 ET 最小,根据其与水热因子的相关性可知,其原因极可能是春季气温升高降水减少导致,因此预防春旱对锡林郭勒草原尤其是荒漠草原的返青和正常生长具有重要意义。

参考文献:

[1] 缪丽娟,蒋冲,何斌,等.近 10a 来蒙古高原植被覆盖变化对气候的响应[J].生态学报,2014,34(5):1295-1301.

[2] 曹鑫,辜智慧,陈晋,等.基于遥感的草原退化人为因素影响趋势分析[J].植物生态学报,2006,30(2):268-277.

[3] 辜智慧,史培军,陈晋,等.基于植被—气候最大响应模型的草地退化评价[J].自然灾害学报,2010,19(1):13-20.

[4] 王海梅.锡林郭勒地区气候变化规律与植被覆盖变化驱动机制研究[D].呼和浩特:内蒙古农业大学,2009:69-85.

[5] 曹立国,刘普幸,张克新,等.锡林郭勒盟草地对气候变化的响应及其空间差异分析[J].干旱区研究,2011,28(5):789-794.

[6] 巴图娜存,胡云锋,艳燕,等.1970 年代以来锡林郭勒盟草地资源空间分布格局的变化[J].资源科学,2012,34(6):1017-1023.

[7] 王颖,张科利,李峰.基于 10 年 MODIS 数据的锡林郭勒盟草原植被覆盖度变化监测[J].干旱区资源与环境,2012,26(9):165-169.

[8] 布仁,包玉海.基于 MOD13A1 的锡林郭勒草原近 13 年植被覆盖变化分析[C]//黄崇福.中国灾害防御协会风险分析专业委员会第六届年会.巴黎:亚特兰蒂斯出版社,2014:859-863.

- [9] 石瑞香. 锡林郭勒草原牧草长势和第一性生产力的动态监测研究[D]. 北京:中国农业科学院, 2005:4-30.
- [10] 张连义. 锡林郭勒草地牧草产量遥感监测模型的研究[D]. 呼和浩特:内蒙古农业大学, 2006:21-72.
- [11] 杭玉玲, 包刚, 包玉海, 等. 2000—2010年锡林郭勒草原植被覆盖时空变化格局及其气候响应[J]. 草地学报, 2014, 22(6):1194-1204.
- [12] 张圣微, 赵鸿彬, 张发, 等. 基于 MODIS NDVI 的锡林郭勒草原近 10 年的时空动态[J]. 草业科学, 2014, 31(8):1416-1423.
- [13] Wang K, Dickinson R E. A review of global terrestrial evapotranspiration: Observation, modeling, climatology, and climatic variability[J]. Reviews of Geophysics, 2012, 50(RG2005):1-54.
- [14] Trenberth K E, Fasullo J T, Kiehl J. Earth's global energy budget[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 2009, 90(3):311-323.
- [15] Jung M, Reichstein M, Ciais P, et al. Recent decline in the global land evapotranspiration trend due to limited moisture supply[J]. Nature, 2010, 467(7318):951-954.
- [16] Li Z, Tang R, Wan Z, et al. A Review of Current Methodologies for Regional Evapotranspiration Estimation from Remotely Sensed Data[J]. Sensors, 2009, 9(5):3801-3853.
- [17] 高彦春, 龙笛. 遥感蒸散发模型研究进展[J]. 遥感学报, 2008, 12(3):515-528.
- [18] 吴桂平, 刘元波, 赵晓松, 等. 基于 MOD16 产品的鄱阳湖流域地表蒸散量时空分布特征[J]. 地理研究, 2013, 32(4):617-627.
- [19] 范建忠, 李登科, 高茂盛. 基于 MOD16 的陕西省蒸散量时空分布特征[J]. 生态环境学报, 2014, 23(9):1536-1543.
- [20] Huang J, Ma H, Liu J, et al. Regional winter wheat yield estimation by assimilating MODIS ET and LAI products into SWAP model[C]// 2013 Second International Conference on Agro-Geoinformatics. IEEE, 2013:454-459.
- [21] 张巧凤, 刘桂香, 于红博, 等. 基于 MOD16A2 的锡林郭勒草原近 14 年的蒸散发时空动态[J]. 草地学报, 2016, 24(2):286-293.
- [22] 蒙古学百科全书地理卷编辑委员会. 蒙古学百科全书. 地理卷[M]. 呼和浩特:内蒙古人民出版社, 2012:830-832.
- [23] 锡林郭勒盟志编纂委员会. 锡林郭勒盟志[M]. 呼和浩特:内蒙古人民出版社, 1996:229-283.
- [24] 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.
- [25] 郭晓寅. 黑河流域蒸散发分布的遥感研究[J]. 自然科学进展, 2005, 15(10):116-120.
- [26] 潘竟虎, 刘春雨. 黄土丘陵沟壑区小流域蒸散发的遥感估算:以静宁县魏沟流域为例[J]. 西北师范大学学报:自然科学版, 2008, 44(5):88-93.
- [27] 宋文献, 江善虎, 杨春生, 等. 基于 SEBS 模型的老哈河流域蒸散发研究[J]. 水资源与水工程学报, 2012, 23(5):115-118.
- [28] 冯晓曦, 秦作栋, 郑秀清, 等. 基于 SEBS 模型的柳林泉域蒸散发研究[J]. 太原理工大学学报, 2014, 45(2):259-264.
- [29] 倪猛, 陈波, 岳建华, 等. 洛河流域蒸散发遥感反演及其与各参数的相关性分析[J]. 地理与地理信息科学, 2007, 23(6):34-37.

(上接第 163 页)

- [14] 吴保生, 刘可晶, 申红彬, 等. 黄河内蒙古河段输沙量与淤积量计算方法[J]. 水科学进展, 2015, 26(3):311-321.
- [15] 王彦君, 吴保生, 王永强, 等. 黄河内蒙古河段非汛期和汛期冲淤量计算方法[J]. 地理学报, 2015, 70(7):1137-1148.
- [16] 冉立山, 王随继, 范小黎, 等. 黄河内蒙古头道拐断面形态变化及其对水沙的响应[J]. 地理学报, 2009, 64(5).
- [17] 苏腾, 王随继, 梅艳国. 水库联合运行对库下汛期河道过水断面形态参数变化率的影响:以黄河内蒙古河段为例[J]. 地理学报, 2015, 70(3):488-500.
- [18] 王随继, 范小黎. 黄河内蒙古不同河型段对洪水过程的响应特征[J]. 地理科学进展, 2010, 29(4):501-506.
- [19] 杨贵斐. 黄河宁夏河段凌汛洪水流量分析研究[J]. 泥沙研究, 1992(6):62-68.
- [20] 师长兴, 范小黎, 邵文伟, 等. 黄河内蒙古河段河床冲淤演变特征及原因[J]. 地理研究, 2013, 32(5):789-796.
- [21] Ta W, Xiao H, Dong Z. Long-term morphodynamic changes of a desert reach of the Yellow River following upstream large reservoirs' operation[J]. Geomorphology, 2008, 97(3):249-259.
- [22] 林秀芳, 郭彦, 侯素玲. 内蒙古十大孔兑输沙量估算[J]. 泥沙研究, 2014(2):15-20.
- [23] 亢庆, 王兴玲. 河道演变的遥感研究方法及应用[J]. 中山大学学报:自然科学版, 1999, 38(5):109-113.
- [24] 钟凯文, 刘万侠, 黄建明. 河道演变的遥感分析研究[J]. 国土资源遥感, 2006(3):69-73.
- [25] Winterbottom S J. Medium and short-term channel planform changes on the Rivers Tay and Tummel, Scotland[J]. Geomorphology, 2000, 34(3):195-208.
- [26] 黄河水利委员会. 黄河流域水文资料[M]. 郑州:黄河水利委员会.
- [27] 李志威, 王兆印, 贾艳红, 等. 三峡水库蓄水前后长江中下游江心洲的演变及其机理分析[J]. 长江流域资源与环境, 2015, 24(1):65-73.
- [28] 董占地, 胡海华, 吉祖稳, 等. 黄河上游宁夏河段河道横断面形态对水沙变化的响应[J]. 泥沙研究, 2015(4):20-25.