

基于MODIS的土壤含水量时空变化及干旱化程度分析

郭焱¹, 于红博^{1,2}, 马梓策¹, 曹聪明¹

(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)

摘要:以内蒙古锡林郭勒盟为研究区域, 基于MODIS数据, 反演得到锡林郭勒盟地表含水量指数(SWCI), 结合野外实测数据对其进行修正。选取了2000—2017年每年7月份, 枯水年(2007年)、平水年(2015年)和丰水年(2012年)生长季4—9月的数据, 结合气象资料对研究区土壤含水量的时空变化特征进行了分析, 通过土壤含水量对锡林郭勒盟干旱化程度进行了定量分析。结果表明: (1) 锡林郭勒盟土壤含水量空间分布自西南向东北呈条带状逐渐增加趋势, 荒漠草原<典型草原<草甸草原。(2) 锡林郭勒盟4—5月份的土壤含水量变化幅度不大, 空间分布较均一; 6—7月份的土壤含水量随着降水的增减而增减, 呈现明显的由西向东增加的空间分布趋势; 8月份, 土壤含水量基本达到最低值; 9月份土壤含水量有所回升。(3) 锡林郭勒盟的土壤含水量与降水、水汽压和相对湿度呈正相关, 与气温呈负相关。(4) 锡林郭勒盟以中度干旱面积为主, 重度干旱面积占比最小; 其中, 苏尼特右旗、二连浩特市、苏尼特左旗、阿巴嘎旗、镶黄旗长期处于中度干旱状态; 东乌珠穆沁旗东部、西乌珠穆沁旗东部、多伦县多数情况无旱情发生。

关键词: MODIS; 土壤含水量; 遥感反演; 干旱

中图分类号: S152.7

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2019)04-0185-05

Analysis of Spatial and Temporal Variations of Soil Moisture Content and Drought Degree Based on MODIS

GUO Tao¹, YU Hongbo^{1,2}, MA Zice¹, CAO Congming¹

(1. College of Geographical Science, Inner Mongolia Normal University, Hohhot 010022, China; 2. Key Laboratory of Remote Sensing and Geography Information System, Inner Mongolia Normal University, Hohhot 010022, China)

Abstract: Taking the Xilin Gol League of Inner Mongolia as the research area, based on the MODIS data, the surface water content index (SWCI) of the Xilin Gol League was obtained by inversion, which was corrected with the field measured data. The data of growing season from April to September of the dry year (2007), the normal year (2015) and the wet year (2012), July of 2000—2017 were selected, and the soil moisture content of the study area was combined with meteorological data. The temporal and spatial variation characteristics were analyzed, and the degree of aridification of the Xilin Gol League was quantitatively analyzed using soil water content. The results show that: (1) the spatial distribution of soil water content in Xilin Gol League gradually increased from southwest to northeast, and the soil moisture increased in the order: desert grassland < typical grassland < meadow grassland; (2) the soil water content of the Xilin Gol League in April and May did not changed much, and the spatial distribution was relatively uniform; the soil water content in June and July increased or decreased with the increase and decrease of precipitation, showing a significant increase trend from west to east; in August, soil water content basically reached the lowest value; soil moisture in September rebounded; (3) the soil water content of Xilin Gol League is positively correlated with precipitation, vapor pressure and relative humidity, and negatively correlated with temperature; (4) Xilin Gol League is dominated by moderate arid area, with the smallest proportion of severe arid area; among them, Sunite Right Banner, Erlianhot City, Sunite Zuoqi, Abaqi Banner and Inlaid Yellow Flag have been in a state of severe drought for a long time; in the eastern part of Dongwuzhumuqi Banner, the eastern part of Xiwuzhumuqi Banner and Duolun County, most cases did not suffer from drought.

收稿日期: 2018-10-25

修回日期: 2018-11-19

资助项目: 国家自然科学基金(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)

第一作者: 郭焱(1977—), 男, 甘肃定西人, 硕士研究生, 研究方向为区域生态学。E-mail: 569577241@qq.com

通信作者: 于红博(1977—), 女(满族), 内蒙古呼和浩特人, 博士, 副教授, 主要从事生态建模与遥感图像处理研究。E-mail: yuboge2003@sohu.com

Keywords: MODIS; soil water content; remote sensing inversion; drought

干旱作为一种较为严重的自然灾害,影响范围广、持续时间长,严重影响农业生产和人类生活,每年全球由于干旱造成的经济损失高达 60~80 亿美元,远高于其他气象灾害^[1-2]。此外,随着温室气体的增加,气温升高,造成土壤中潜在水分损失,而土壤含水量是评价干旱化程度的一个重要指标^[3]。因此,了解土壤含水量时空分布特征变化对农牧业生态系统具有重要意义。目前,常用的土壤含水量测量方法主要分为实地测量法、土壤水分模型法、遥感法 3 种;其中,传统的实地测量法精度较高,但是获取数据慢、花费大量人力物力财力,难以实现大范围监测的需要^[4];土壤水分模型法是用来模拟林地土壤水分变化的专用模型,通过模拟土壤水分垂直方向的运动,能够精确地预测不同森林类型根系区土壤水分日变化值^[5];遥感技术虽然存在一定的局限性,但遥感数据以高的时空分辨率和实时监测的优势,为大范围区域土壤含水量的监测开辟了新的途径^[6-7]。

锡林郭勒草原位于生态防护带的中心位置,具有极其重要的生态服务功能^[8]。气候属于中温带半干旱、干旱大陆性气候,降水量稀少,气温普遍偏高,蒸发过程速度快,引起土壤含水量降低,植被生产力下降,了解土壤含水量时空分布特征对该区域生态系统可持续发展具有重要意义^[9-10]。研究选用地表含水量指数(SWCI, surface water capacity index)模型,利用 MODIS 遥感数据,获得锡林郭勒盟的 SWCI,然后结合野外实测数据对其进行修正和精度验证,得到 2000—2017 年每年 7 月研究区土壤含水量空间分布图。按照反演结果选取了枯水年(2007 年)、平水年(2015 年)和丰水年(2012 年)3 种年份,结合气象数据对研究区生长季 4—9 月土壤含水量的动态变化进行分析;通过土壤含水量对研究区干旱化程度进行划分,获得干旱化程度分布状况图,分析不同年份不同地区的干旱化程度。以此了解锡林郭勒盟土壤含水量的空间分布特点以及区域干旱化程度,为抗旱减灾决策、水利建设规划和水资源保护提供科学依据。

1 数据来源及研究方法

1.1 研究区概况

锡林郭勒盟位于内蒙古自治区中部,地处东经 115°13′—117°06′,北纬 43°02′—44°52′,占地面积达 20.26 万 km²,海拔在 800~1 300 m,既是国家重要的畜产品基地,又是西部大开发的前沿。锡林郭勒盟属于中温带半干旱、干旱大陆性气候,年平均气温在 0~4℃,降雨量大多集中在 7—9 月份,平均降水量为

200~350 mm,由西北至东南呈现递增态势。研究区主要的地带性植被为草原,依水平地带性分异,由西至东分别分布有荒漠草原、典型草原、草甸草原 3 个亚型。锡林郭勒盟是西北干旱区向东部湿润区过渡的地带,也是响应全球变化的敏感区域之一^[11]。地理位置以及实测样地路线如图 1 所示。

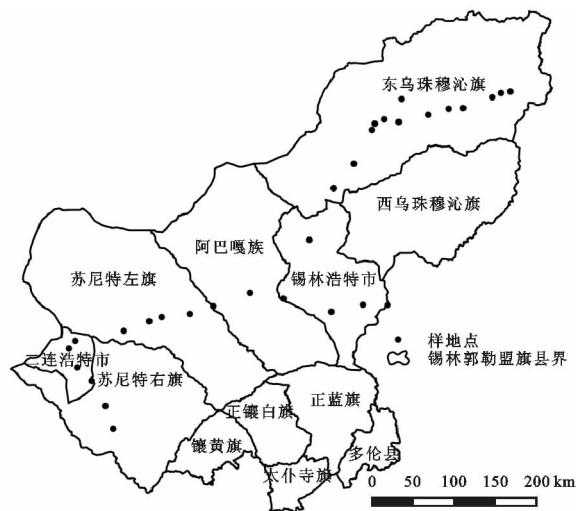


图 1 锡林郭勒盟地理位置

1.2 数据来源及处理

所用 MODIS 遥感数据为美国航空航天局(NASA)提供的 2000—2016 年的部分遥感影像数据,为 8 d 合成数据,空间分辨率为 500 m。利用 MRT 软件对选取的遥感数据进行投影变换和镶嵌,筛选出研究所需要的波段(6,7 波段),运用 ENVI 5.3 进行波段整合、裁剪和运算,得到土壤含水量反演图,采用 Albers(双标准纬线等积圆锥)投影。在 ArcGIS 10.3 软件中制图。

气象数据(降水量、气温、气压、水汽压、风速和相对湿度)均由国家气象数据共享服务平台提供,运用 SPSS 软件,进行配对样本 T 检验,得到各气象要素与土壤含水量之间的相关性。

1.3 地表含水量指数(SWCI)

水分吸收高峰与植被土壤反射低谷波段相近,MODIS 遥感数据中 6,7 波段分别对应水反射高峰和植被土壤反射低谷,对水分反射率变化较为敏感,且 6,7 波段有极为相同的大气散射和辐射值,因此可以根据 6,7 波段计算得到地表含水量指数(surface water capacity index, SWCI),计算公式如下^[12]:

$$SWCI = \frac{b_6 - b_7}{b_6 + b_7} \quad (1)$$

式中: b_6 , b_7 分别为第 6、7 波段反射值。

所得结果为日均值,将影像所占天数作为权值合成为月 SWCI 数据,为使反演结果更加精确,用野外实测的

土壤体积含水量数据(2013 年 7—9 月、2014 年 5—6 月 0—50 cm 土层)与同期遥感反演对应点的数据建立了相关模型。选择 SWCI 数据为自变量,0—50 cm 土壤含水量实测数据为因变量,建立关系模型,用来修正遥感反演结果,5 个月的关系模型分别如下:

$$Y_5 = 3.741b_5^2 - 0.5172b_5 + 0.1143 \quad R = 0.678 \quad (2)$$

$$Y_6 = 0.3158b_6^{0.5353} \quad R = 0.704 \quad (3)$$

$$Y_7 = 0.0521e^{3.6254b_7} \quad R = 0.744 \quad (4)$$

$$Y_8 = 2.227b_8^2 - 0.4141b_8 + 0.0716 \quad R = 0.808 \quad (5)$$

$$Y_9 = 5.0564b_9^2 - 1.306b_9 + 0.1762 \quad R = 0.635 \quad (6)$$

式中: Y_a 表示 a 月的土壤含水量; b_a 表示 a 月的 SWCI 值。

1.4 遥感反演结果验证

采用 2017 年的土壤含水量实测数据对同期遥感反演结果进行点上的验证。

将 2017 年 5—9 月 0—50 cm 土层的实测数据与同期遥感数据进行比较,作 χ^2 检验,由公式 $\chi^2 = \sum(V_1 - V_2)^2/V_2$,获得 χ^2 检验值,其中 V_1 为遥感数据, V_2 为实测数据,5—9 月的 χ^2 检验值分别为 1.64,1.06,0.71,0.75,3.01,均小于检验临界值 $X_{(0.05)}^2(29) = 42.557$,检验结果说明遥感值与实测值无明显差异,表明遥感反演结果可信。

1.5 干旱化等级划分

基于土壤含水量的干旱化程度划分,一般根据土壤相对湿度进行划分,将土壤的相对湿度换算为土壤体积含水量,可得到由土壤体积含水量划分的干旱化等级^[2](表 1)。

表 1 土壤含水量的干旱等级

等级	RMS/%	SVM/%	干旱影响程度
无干旱	RMS>60	SVM>12	地表正常或湿润,无干旱现象
轻度干旱	50<RMS≤60	10<SVM≤12	地表蒸发量较小,近地表空气干燥
中度干旱	40<RMS≤50	8<SVM≤10	地表干燥,植物叶片有萎蔫现象
重度干旱	30<RMS≤40	6<SVM≤8	地表干土层较厚,植物萎蔫,叶片干枯
特大干旱	RMS≤30	SVM≤6	基本无土壤蒸发,植物干枯或死亡

注:RMS 为土壤相对湿度,SVM 土壤体积含水量。

1.6 丰、平、枯水年计算标准

目前国内比较常用的分析丰水年、平水年、枯水年的标准如下:

丰水年: $P_i > \bar{P} + 0.33W$;枯水年: $P_i < \bar{P} - 0.33W$,其中 \bar{P} 为多年平均降水量, P_i 为逐年年降水量, W 为均方差; P_i 与 $\bar{P} \pm 0.33W$ 相近时为平水年。由此计算可得 2007 年为枯水年、2012 年为丰水年、2015 年为平水年。

2 结果与分析

2.1 土壤含水量空间变化特征

由此利用锡林郭勒盟 2000—2017 年每年 7 月,2007

年(枯水年),2012 年(丰水年),2015 年(平水年)生长季 4—9 月的遥感影像和土壤体积含水量实测数据,反演得到土壤体积含水量空间分布图(附图 1)。

由 2000—2016 年大量遥感反演结果可知,2000—2016 年研究区土壤含水量空间分布自西南向东北均呈条带状逐渐增加趋势。其中,研究区西南部的苏尼特左旗、苏尼特右旗和二连浩特市生长季土壤含水量均为 3%~11%,主要是因为该区域草原类型为荒漠草原,土壤固水能力较差,土壤含水量最低;南部的太仆寺旗与多伦县属于农牧交错区,通过农业灌溉用水补给,导致土壤含水量较多,且多伦县拥有丰富的水资源与森林资源,因此,土壤含水量偏高;中部偏东的大部分地区土壤含水量基本在 11%~15%,主要为典型草原;研究区的东乌珠穆沁旗、西乌珠穆沁旗东北部土壤含水量最高,均在 15%以上,主要为草甸草原。

以平水年土壤含水量空间分布图作参考,在 2012 年的丰水年时期,研究区土壤含水量丰沛;在 2007 年的枯水年时期,研究区土壤含水量低值区从西南向东部延伸,土壤干旱化严重。其中,东乌珠穆沁旗中西部、西乌珠穆沁旗西部、锡林浩特市、阿巴嘎旗北部和太仆寺旗在不同年份中的土壤含水量变化幅度明显高于其他地区。

2.2 土壤含水量时间变化特征

2000—2017 年 7 月份的土壤含水量和降水量变化趋势如图 2 所示。土壤含水量和降水量变化趋势基本一致,2012 年 7 月土壤含水量最大,2017 年 7 月土壤含水量最小;在丰水年,7 月份降水量充沛,地面有充足的水分补给,土壤含水量增大;在枯水年,降水量稀少,且由于植被处于生长旺季,植被蒸腾作用散失了大量水分,水分收支严重不平衡,支出远远高于补给,因此,枯水年土壤干旱化程度严重。

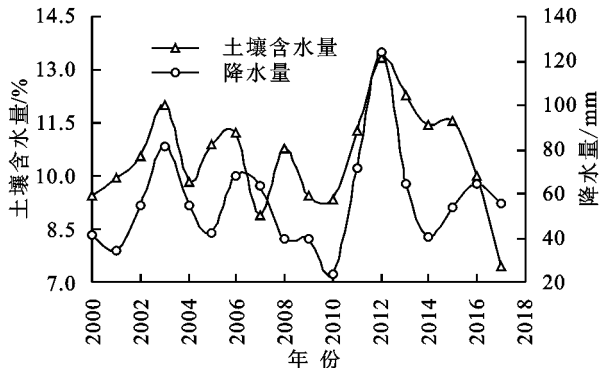


图 2 锡林郭勒盟 2000—2017 年 7 月土壤含水量和降水量变化趋势

图 3 为锡林郭勒盟生长季 4—9 月份土壤含水量变化曲线,曲线的位置随枯水年、平水年和丰水年基

本呈上升的趋势。其中,研究区 4—5 月份为非雨季,降水量稀少,土壤含水量主要为冬季冰雪融水供给,因此 4—5 月份土壤含水量变化幅度较小,在 11% 上下波动;研究区 6—7 月份为雨季,土壤含水量随着降水量的增减而增减,因此不同年份土壤含水量变化幅度具有明显差异,在 9%~11% 波动;8 月份,土壤含水量基本为生长季最低值,主要是由于此时降雨减少,气温仍较高,植被处于生长旺季,植被蒸腾土壤水分蒸发仍然较大,因此土壤失水较多;9 月份土壤含水量有回升趋势,虽然雨季已过,降水量减少,但是气温下降,植被大部分枯萎,植被蒸腾土壤水分蒸发减少,因此,土壤含水量有所回升。

2.3 土壤含水量与气象要素的相关性分析

用 SPSS 软件分析了 2000—2017 年锡林郭勒盟的土壤含水量与气象因素之间的相关性,结果见表 2。由此可知,研究区的土壤含水量与降水量、水汽压和大气相对湿度均呈正相关,且均通过显著性检验

表 2 锡林郭勒盟土壤含水量与气象因素相关性

项目	降水/mm	大气压/hPa	风速/(m·s ⁻¹)	气温/℃	水汽压/hPa	大气相对湿度/%
相关系数	0.692	-0.279	-0.055	-0.653	0.684	0.771
<i>p</i>	0.002	0.278	0.833	0.005	0.002	<0.001

降水量偏多、气温偏低的年份土壤含水量普遍偏高,降水量偏少、气温偏高的年份土壤含水量相应降低。降水量和气温是土壤含水量大小的主要限制因子。

2.4 基于土壤含水量的干旱化分析

根据表 1,对丰、平、枯年生长季 4—9 月份的土壤含水量进行月平均,得到 3 个年份的生长季月平均土壤含水量,按照干旱等级进行划分,利用 ArcGIS 10.3 进行面积统计,分析锡林郭勒盟不同年份不同区域的干旱化程度(表 3,附图 2)。

锡林郭勒盟的干旱化程度主要以中度干旱为主,均高达 40% 以上,重度干旱面积所占比例最小,约为 1%~2%,无干旱和轻度干旱适中。在枯水年 2007 年,中度干旱面积明显增加,达到 79%,干旱化程度严重;在平水年 2015 年,中度干旱面积为 52%,无干旱和轻度干旱面积占比较枯水年明显增加;在丰水年 2012 年,无干旱面积明显增加。

表 3 锡林郭勒盟生长季干旱化等级面积及比例

年份	项目	无干旱	轻度干旱	中度干旱	重度干旱
2007 年 (枯水年)	面积/万 km ²	1.60	2.48	15.95	0.20
	比例/%	8.00	12.00	79.00	1.00
2012 年 (丰水年)	面积/万 km ²	7.97	3.63	8.45	0.41
	比例/%	39.00	18.00	41.00	2.00
2015 年 (平水年)	面积/万 km ²	5.94	3.51	10.60	0.41
	比例/%	29.00	17.00	52.00	2.00

由附图 2 可知,2015 年(平水年),苏尼特右旗、

($p<0.01$);土壤含水量与气温呈负相关,且通过显著性检验($p<0.01$);土壤含水量与大气压、风速呈负相关,且没有明显的相关性($p>0.05$)。锡林郭勒盟属于中温带半干旱—干旱大陆性气候,主要植被类型为草原,土壤水分供给大部分来源于自然降水,随着降水的增减而增减;在生长期植物处于生长旺季,温度偏高时,蒸腾和蒸发量增加,会大量消耗土壤中的水分,因此,土壤含水量降低。

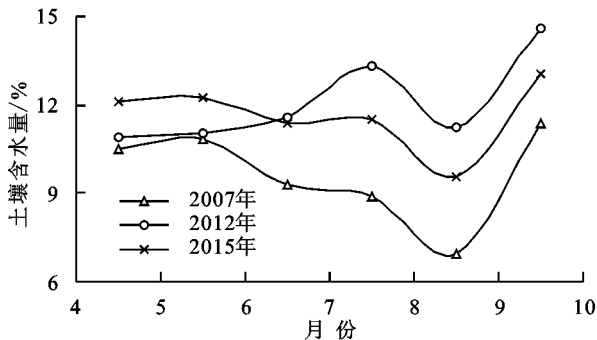


图 3 锡林郭勒盟生长季 4—9 月份土壤含水量变化曲线

二连浩特、苏尼特左旗、镶黄旗、正镶白旗、阿巴嘎旗、锡林浩特、东乌珠穆沁旗西部、西乌珠穆沁旗西北部的大部分区域表现为中旱;正蓝旗、多伦县、太仆寺的大部分区域表现为轻旱;东乌珠穆沁旗中部和东部、西乌珠穆沁旗东部的大部分区域无旱情。2012 年(丰水年),苏尼特右旗、二连浩特、苏尼特左旗阿巴嘎旗、锡林浩特北部、东乌珠穆沁旗西部的大部分区域属于中度干旱;阿巴嘎旗北端、正蓝旗部分区域表现为轻度干旱,东乌珠穆沁旗中部和东部、西乌珠穆沁旗、锡林浩特南部、正镶白旗、正蓝旗南部、多伦县、太仆寺的大部分区域无干旱情况。2007 年(枯水年),除东乌珠穆沁旗东部、西乌珠穆沁旗东部、锡林浩特南部、多伦县的少部分区域无旱情外,其余绝大部分区域均呈现中度干旱。

在分析的 3 个年份中,苏尼特右旗、二连浩特、苏尼特左旗、阿巴嘎旗、镶黄旗长期处于中度干旱状态;东乌珠穆沁旗东部、西乌珠穆沁旗东部、多伦县大部分时间无旱情发生。枯水年干旱覆盖范围最广,丰水年干旱覆盖范围最小,平水年适中。

3 结论

(1) 2000—2017 年研究区土壤含水量空间分布自西南向东北均呈条带状逐渐增加趋势,荒漠草原<典型草原<草甸草原。丰水年,研究区土壤含水量丰

沛;枯水年,土壤含水量低值区从西南向东部延伸,土壤干旱化严重;其中,不同年份的东乌珠穆沁旗中西部、西乌珠穆沁旗西部、锡林浩特市、阿巴嘎旗北部和太仆寺旗土壤含水量变化幅度明显高于其他区域。

(2) 在研究区植被生长季,4—5 月份的土壤含水量变化幅度不大;6—7 月份的土壤含水量随着降水的增减而增减;在 8 月份,土壤含水量基本达到生长季最低值;9 月份土壤含水量有回升趋势。

(3) 研究区土壤含水量与降水、水汽压和相对湿度呈正相关关系($p<0.01$),与气温呈负相关关系($p<0.01$),与大气压、风速呈负相关,但没有明显的相关性($p>0.05$)。

(4) 研究区土壤干旱化程度严重,主要以中度干旱为主,无干旱和轻度干旱适中,重度干旱面积最小。以锡林郭勒盟平水年的干旱化程度状况图为标准,在丰水年,中度干旱面积明显减少,转化为无干旱和轻度干旱区;在枯水年,中度干旱面积明显增加,无干旱和轻度干旱地区明显缩减。所分析的丰、平、枯 3 个年份,苏尼特右旗、二连浩特、苏尼特左旗、阿巴嘎旗、镶黄旗长期处于中度干旱状态;东乌珠穆沁旗东部、西乌珠穆沁旗东部、多伦县大部分时间无旱情发生。

参考文献:

[1] 薛天翼,白建军. 基于 TVDI 和气象数据的陕西省春季旱情时空分析[J]. 水土保持研究,2017,24(4):240-246.
[2] 张巧凤,刘桂香,于红博,等. 锡林郭勒草原土壤含水量

遥感反演模型及干旱监测[J]. 草业学报,2017,26(11): 1-11.
[3] 李杉,艾丽坤. 中美半干旱区地表能量通量变化特征比较[J]. 高原气象,2014,33(5):1262-1271.
[4] 王利民,刘佳,邓辉,等. 我国农业干旱遥感监测的现状与展望[J]. 中国农业资源与区划,2008,29(6):4-8.
[5] 张岩,朱岩,张建军,等. 林地土壤水分模型 SWUF 在晋西黄土高原的适用性[J]. 林业科学,2012,48(5):8-14.
[6] Neale C M U, Geli H M E, Kustas W P, et al. Soil water content estimation using a remote sensing based hybrid evapotranspiration modeling approach [J]. Advances in Water Resources, 2012,50:152-161.
[7] Zhao G, Wang H, Li J, et al. Study on spatial variation of soil moisture in coal mining subsidence area in Mu Us Sandy Land[J]. Asian Agricultural Research, 2018,10(3):66-70.
[8] 李政海,鲍雅静,王海梅,等. 锡林郭勒草原荒漠化状况及原因分析[J]. 生态环境,2008,17(6):2312-2318.
[9] 李相,丁建丽,黄帅,等. 实测高光谱和 HSI 影像的区域土壤含水量遥感监测研究[J]. 土壤,2016,48(5):1032-1041.
[10] 佟斯琴,张继权,哈斯马,等. 基于 MOD16 的锡林郭勒草原 14 年蒸散发时空分布特征[J]. 中国草地学报, 2016, 38(4):83-91.
[11] 徐广才,康慕谊,李亚飞. 锡林郭勒盟土地利用变化及驱动力分析[J]. 资源科学,2011,33(4):690-697.
[12] 杜晓,王世新,周艺,魏华. 一种新的基于 MODIS 的地表含水量模型构造与验证[J]. 武汉大学学报:信息科学版,2007(3):205-207,211.

(上接第 184 页)

[19] Dai A. Drought under global warming: a review[J]. Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change, 2011,2(1):45-65.
[20] 张利利,周俊菊,张恒玮,等. 基于 SPI 的石羊河流域气候干湿变化及干旱事件的时空格局特征研究[J]. 生态学报,2017,37(3):996-1007.
[21] 陈琰,肖伟华,王建华,等. 基于 SPEI 的三江平原干旱时空分布特征分析[J]. 中国水利水电科学研究院学报,2018,16(2):122-129.
[22] 李运刚,何娇楠,李雪. 基于 SPEI 和 SDI 指数的云南红河流域气象水文干旱演变分析[J]. 地理科学进展, 2016,35(6):758-767.
[23] Fossey M, Rousseau A N. Assessing the long-term hydrological services provided by wetlands under changing climate conditions: A case study approach of a

Canadian watershed[J]. Journal of Hydrology, 2016, 32(541):1287-1302.
[24] 汪爱华,张树清,张柏. 三江平原沼泽湿地景观空间格局变化[J]. 生态学报,2003,23(2):237-243.
[25] 刘吉平,马海超,赵丹丹. 三江平原孤立湿地景观空间结构[J]. 生态学报,2016,36(14):4307-4316.
[26] 吴志刚,杜春晓,王世岩. 三江平原沼泽湿地退化现状及因素分析[J]. 黑龙江水利科技,2007,35(5):119-121.
[27] 吴燕锋,章光新. 松花江区气象水文干旱演变特征[J]. 地理科学,2018,38(10):1731-1739.
[28] 关静,梁川,赵璐,等. 3 种干旱指数在宁夏中部干旱带的适用性分析[J]. 水土保持研究,2018,25(3):122-127.
[29] Shi P, Ma X, Hou Y, et al. Effects of land-use and climate change on hydrological processes in the upstream of Huai River, China[J]. Water Resources Management, 2013, 27(5):1263-1278.