

DOI: 10.11686/cyxb2017024

http://cyxb.lzu.edu.cn

张巧凤, 刘桂香, 于红博, 玉山, 包玉海. 锡林郭勒草原土壤含水量遥感反演模型及干旱监测. 草业学报, 2017, 26(11): 1-11.

ZHANG Qiao-Feng, LIU Gui-Xiang, YU Hong-Bo, YU Shan, BAO Yu-Hai. Soil moisture modelling and drought monitoring using remote sensing in Xilingol grassland. Acta Prataculturae Sinica, 2017, 26(11): 1-11.

锡林郭勒草原土壤含水量遥感反演模型及干旱监测

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

(1. 内蒙古师范大学地理科学学院, 内蒙古 呼和浩特 010022; 2. 中国农业科学院草原研究所, 内蒙古 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, 内蒙古 呼和浩特 010022; 4. 内蒙古自治区蒙古高原灾害与生态安全重点实验室, 内蒙古 呼和浩特 010022)

摘要: 土壤含水量是农牧业干旱监测系统的重要因子, 对草原植被的生长及其与环境的相互作用具有重要意义。利用 MODIS MOD16A2 蒸散发 (evapotranspiration, ET) 月产品数据及测墒站实测土壤含水量, 通过相关分析和回归分析等方法, 建立了基于蒸散发亏缺指数 (evapotranspiration deficit index, ETDI) 的土壤体积含水量 (soil volumetric moisture, SVM) 反演模型 $SVM = -48.851 \times ETDI + 54.669$, 该模型的均方根误差为 3.27%, 达到了区域土壤含水量快速反演的应用水平。基于国家标准确定该模型的干旱等级阈值, 分析近 15 年 (2000—2014 年) 锡林郭勒草原的干旱动态特征, 结果表明, 草甸草原的土壤含水量在 14% 上下波动, 基本为无旱, 只有 2007 和 2009 年发生轻旱; 典型草原、沙地植被和总体的土壤含水量在 11% 上下波动, 基本为轻旱, 只有 2007 和 2009 年发生中旱; 荒漠草原的土壤含水量在 8% 上下波动, 基本为重旱等级, 只有 2002、2003 和 2012 年为中旱。近 15 年锡林郭勒草原平均约 66% 的面积存在不同程度的干旱, 无旱和重旱面积呈增加趋势, 轻旱和中旱面积呈减少趋势, 但变化均不显著 ($P > 0.05$)。

关键词: 锡林郭勒草原; 土壤体积含水量; 干旱监测; 蒸散发

Soil moisture modelling and drought monitoring using remote sensing in Xilingol grassland

ZHANG Qiao-Feng^{1,2,3,4}, LIU Gui-Xiang^{2*}, YU Hong-Bo^{1,3,4}, YU Shan^{1,3,4}, BAO Yu-Hai^{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 Key Laboratory of Disaster and Ecological Security on the Mongolian Plateau, Hohhot 010022, China

Abstract: Soil moisture is an important factor for grassland vegetation growth and its measurement is a critical task for drought monitoring systems. In order to monitor moisture in Xilingol grassland, monthly evapotranspiration (ET) data from MODIS MOD16A2 and measured soil moisture data from ground monitoring stations were collected. Correlation and regression analyses were employed to establish a retrieval model for soil volumetric moisture (SVM) based on the evapotranspiration deficit index (ETDI): $SVM = -48.851 \times ETDI + 54.669$. The root mean square error (RMSE) of this model was 3.27%. This model can be used to retrieve soil

收稿日期: 2017-01-18; 改回日期: 2017-05-04

基金项目: 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), 内蒙古自治区自然科学基金(2017MS0408), 内蒙古师范大学高层次人才科研启动项目(2016YJRC012)和国家自然科学基金(41661009)资助。

作者简介: 张巧凤(1978-), 女, 内蒙古土左旗人, 博士。E-mail: zqf2099@163.com

* 通信作者 Corresponding author. E-mail: liugx804@163.com

moisture at regional scale. The thresholds of drought grades were established based on the national standard and used to analyze drought dynamics in Xilingol grassland over the past 15 years (2000–2014). The results showed that SVM fluctuated in 14% of the meadow steppe, approximating normal levels except for the slight droughts in 2007 and 2009. SVM fluctuated in 11% of the typical steppe and the sandy vegetation areas, as well as in the Xilingol grassland as a whole, approaching slight drought conditions except for the moderate droughts recorded in 2007 and 2009. SVM fluctuated in 8% of desert steppe, approaching severe drought conditions except for the moderate droughts recorded in 2002, 2003 and 2012. On average, over the past 15 years some 66% of the Xilingol grassland has experienced drought conditions, though to varying degrees. Non-drought and severe drought areas increased, while slight and moderate drought areas decreased, but significant tests indicate that none of the changes were significant ($P>0.05$).

Key words: Xilingol grassland; soil volumetric moisture (SVM); drought monitoring; evapotranspiration (ET)

干旱是人类社会面临的最为严重的自然灾害之一,每年因干旱造成的全球经济损失高达 60~80 亿美元,远远超出了其他气象灾害^[1]。干旱的频繁发生和长期持续,给社会经济、特别是农牧业生产带来巨大的损失,因此实时有效的干旱监测指标对农牧业生态系统具有重要意义。目前常用的干旱监测指标主要分为基于气象数据和基于遥感数据两大类,基于气象数据的监测指标存在由点到面转换的误差,对于大范围的区域干旱监测常常会因为站点少而大大降低了干旱监测的精度和适用性;随着遥感技术的快速发展,遥感数据以其很高的时空分辨率和实时快速的监测优势,为大范围的区域干旱监测开辟了新途径。

近 20 多年来,用于评价区域干旱的遥感监测指标可基于可见光、近红外、热红外和微波波段等全部对地遥感波谱域,如基于可见光和近红外波段的距平植被指数(anomaly vegetation index, AVI)^[2]和植被状态指数(vegetation condition index, VCI)^[3]等;基于热红外波段的温度状态指数(temperature condition index, TCI)^[4];基于可见光—近红外—热红外波段的温度植被干旱指数(temperature vegetation dryness index, TVDI)^[5]、植被水分供应指数(vegetation supply water index, VSWI)^[6]和条件植被温度指数(vegetation temperature condition index, VTCD)^[7]等;主被动微波遥感由于其穿透薄云和稀疏植被及对土壤水分的探测能力,近年来被广泛应用于农牧业干旱监测领域^[8-9];与主被动微波遥感相比,可见光、近红外和热红外波段的遥感数据由于其更高的时空分辨率及其与土壤湿度的高相关性,近年来的使用率呈现增长趋势^[10]。

土壤含水量是农牧业干旱监测的有效因子,但是由于野外实测土壤含水量需要耗费大量的人力、物力和财力,并且很难用于大范围和长时间的干旱监测,因此将遥感的区域监测优势和实测土壤含水量的有效性结合起来,对提高区域干旱监测的适用性和有效性具有重要作用。本研究应用锡林郭勒草原 2010—2014 年生长季 4—10 月的实测土壤含水量和对应时空位置的 MODIS 遥感数据,通过分析常用的遥感因子与实测土壤含水量的相关性提炼表征草原干旱的特征参量,建立土壤含水量反演模型,结合国家气象干旱等级标准^[11]确定该模型的干旱等级阈值,分析近 15 年(2000—2014 年)锡林郭勒草原干旱的时空动态特征及对产草量的影响。

1 材料与方 法

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, E 111°09′—120°01′, N 41°35′—46°46′。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 °C,最高气温在 7 月,平均为 22 °C;年降水量 200~360 mm,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 2800~3200 h,4—9 月太阳辐射约占全年的 60%;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。水平地带性土壤类型自东向西有黑钙土、栗钙土和棕钙土。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(图 1)^[12-13]。草甸草原的主要建群种为贝加尔针茅(*Stipa baicalensis*)、羊草(*Leymus chinensis*)和线叶菊(*Filifolium sibiricum*),主要伴生种有糙隐子草(*Cleistogenes squarrosa*)、寸草苔(*Carex duriuscula*)和扁蓿豆(*Melilotids ruthenica*)等;典型草原的主要建群种为大针茅(*Stipa grandis*)、克氏针茅(*Stipa krylovii*)和羊草,主要伴生种有糙隐子草、冷蒿(*Artemisia frigida*)、寸草苔和知母(*Anemarrhena asphodeloides*)等;荒漠草原主要以小针茅(*Stipa klemenzi*)建群,主要伴生种有无芒隐子草(*Cleistogenes songorica*)、冷蒿和木地肤(*Kochia prostrata*)等;沙地植被主要建群植物有榆树(*Ulmus pumila*)、褐沙蒿(*Artemisia halodendron*)和小叶锦鸡儿(*Caragana microphylla*)等。

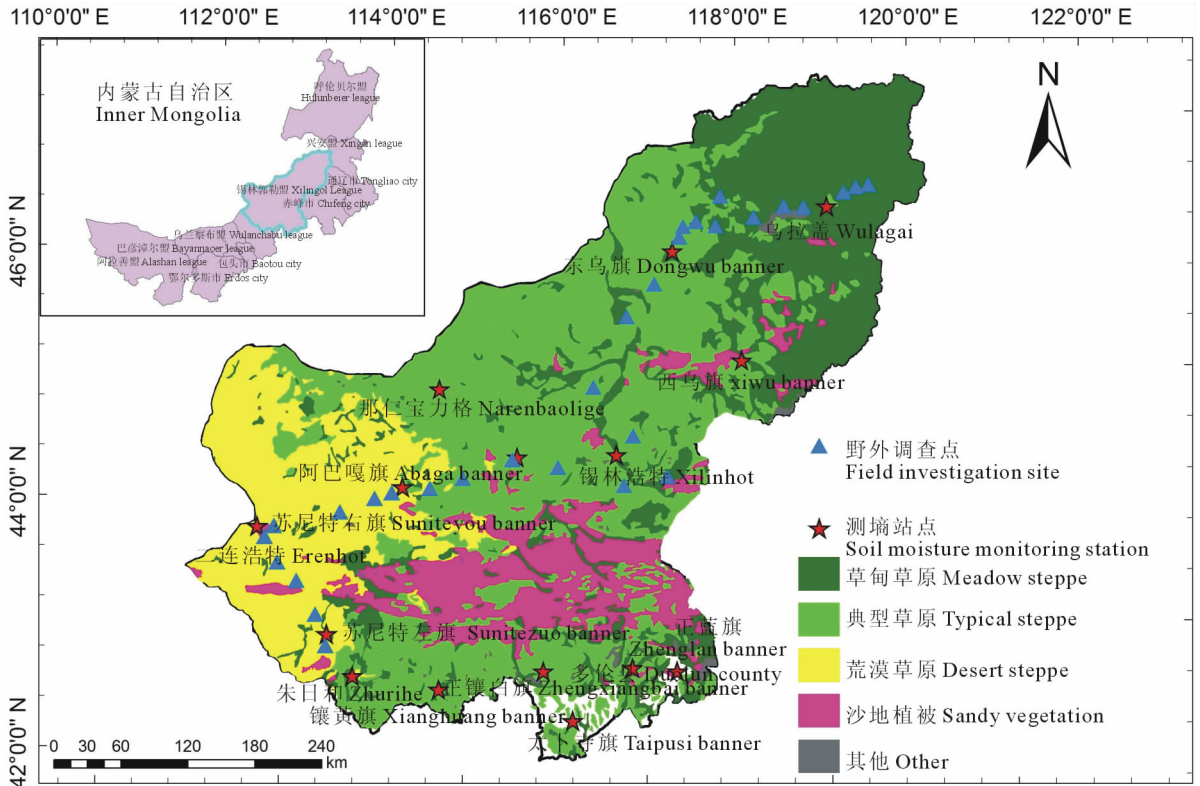


图 1 锡林郭勒草原类型及土壤测墒站和野外调查点

Fig. 1 Xilingol grassland type and the soil moisture monitoring station and the field investigation site

1.2 数据来源与处理

1.2.1 遥感数据

MODIS 遥感数据来源于美国航空航天局(National Aeronautics and Space Administration, NASA),时间跨度为 2000—2014 年,数据产品为 MOD16A2(evapotranspiration, ET)、MOD13A3(normalized difference vegetation index, NDVI)和 MOD11A1(land surface temperature, LST),MOD16A2 和 MOD13A3 的时间分辨率为月尺度,MOD11A1 的时间分辨率为天尺度,空间分辨率均为 1 km。利用 MRT(MODIS Re-projection Tools)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 椭球体的 Albers Equal Area 投影,同时完成影像的拼接。天尺度的地表温度数据 MOD11A1 通过最大值合成月尺度数据。

目前,基于归一化植被指数(NDVI)和地表温度(LST)的干旱监测指标应用极为广泛,具有代表性的指标有距平植被指数(AVI)、植被状态指数(VCI)、植被供水指数(VSWI)和温度植被干旱指数(TVDI)等;参考文献[14]中关于水分胁迫比(water stress ration, WS)的公式计算了蒸散发亏缺指数(evapotranspiration deficit index,ETDI)。依据文献提供的方法^[2-3,5-6,14]计算干旱监测指标。

$$AVI = NDVI_i - \overline{NDVI} \quad (1)$$

式中: $NDVI_i$ 为某个月的 NDVI 值, \overline{NDVI} 为多年该月 NDVI 的平均值。

$$VCI = \frac{NDVI_i - NDVI_{\min}}{NDVI_{\max} - NDVI_{\min}} \times 100 \quad (2)$$

式中: $NDVI_i$ 为某个月的 NDVI 值, $NDVI_{\min}$ 和 $NDVI_{\max}$ 分别为多年该月 NDVI 的最小值和最大值。

$$VSWI = \frac{NDVI}{LST} \quad (3)$$

式中: $NDVI$ 和 LST 分别为同一个月的 NDVI 和 LST 值。

$$TVDI = \frac{LST - LST_{\min}}{LST_{\max} - LST_{\min}} \quad (4)$$

$$LST_{\max} = a_1 + b_1 \times NDVI$$

$$LST_{\min} = a_2 + b_2 \times NDVI \quad (5)$$

式中: LST 是像元的地表温度, LST_{\min} 和 LST_{\max} 分别为某一 $NDVI$ 值对应的最小地表温度即湿边和最大地表温度即干边, a_1 、 b_1 、 a_2 、 b_2 是干湿边拟合方程的系数, 在干边上 $TVDI=1$, 在湿边上 $TVDI=0$ 。

$$ETDI = 1 - \frac{ET}{PET} \quad (6)$$

式中: ET 为某一个时段的实际蒸散发, PET (potential evapotranspiration) 为潜在蒸散发。潜在蒸散发也称为可能蒸散发量, 是指大片而均匀的自然表面在足够湿润条件下即水分保持充分供应时的蒸散发量, 潜在蒸散发量是实际蒸散发量的理论上限。

利用锡林郭勒盟界线和各类草原类型界线裁剪各月的 ET 、 $NDVI$ 、 LST 及公式(1~6)中计算的干旱监测指标影像, 利用测墒站点提取影像对应位置 3×3 像元的平均值。在此基础上分析月尺度的遥感干旱监测因子和指标与各层土壤含水量的相关性, 选择相关性最大的因子或指标构建土壤含水量遥感反演模型。

1.2.2 土壤含水量数据

土壤含水量数据来源于内蒙古自治区生态与农业气象中心, 锡林郭勒盟界内共 15 个土壤墒情监测站(图 1) 2010—2014 年 4—10 月的旬尺度实测土壤含水量数据, 观测厚度为 0~10 cm、10~20 cm、20~30 cm、30~40 cm、40~50 cm, 剔除有缺测土壤层的数据点和有明显异常的数据点, 计算上中下旬平均值作为月尺度实测土壤含水量, 每层共计 391 个有效数据。由于锡林郭勒草原草本植物根系主要分布在 0~30 cm 土壤层内、局部地区分布在 0~50 cm 土壤层内, 因此分析 0~10 cm、0~20 cm、0~30 cm 和 0~50 cm 的平均土壤含水量与遥感数据的相关性, 选择相关性最高的土壤含水层建立反演模型。

1.2.3 辅助数据

1) 野外调查数据。为了分析草原干旱对产草量的影响, 利用常用的归一化植被指数 $NDVI$ 与野外实测的产草量建立产草量反演模型。实测产草量来源于 2013—2014 年共 5 个时段(5—9 月)对 30 个野外样地的重复调查, 其中草甸草原和荒漠草原的样地数均为 9 个, 典型草原的样地数为 12 个(图 1), 每个样地采用标准 $1 \text{ m} \times 1 \text{ m}$ 样方, 3 次重复; 草本植物的鲜重为现场密封后室内去皮称重, 干重为室内 $65 \text{ }^\circ\text{C}$ 烘干 72 h 称重, 建模数据采用干重。

2) 降水量数据。为了分析土壤含水量对降水量的响应, 利用锡林郭勒草原 15 个气象站点 2000—2014 年的月尺度(1—12 月)降水量, 对每年各月的 15 个站点降水量求平均, 再计算每年 1—12 月的总降水量, 分析年降水量与土壤含水量的相关性。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。

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, $P < 0.01$ 为极显著, $P < 0.05$ 为显著, $P > 0.05$ 为不显著。

2 结果与分析

2.1 产草量反演模型的建立和验证

利用图 1 所示的野外调查点分别提取对应时间地点的 $NDVI$ 值, 结合实测产草量数据, 随机选取各类草原的

2/3 样本建模,1/3 用于精度检验,通过直线、对数、二次多项式、指数和幂函数方程分别建模后发现,幂函数 $Y = 576.03 \times \text{NDVI}^{1.90}$ ($R^2 = 0.718, \text{RMSE} = 0.57, P = 0.0001$, 样本个数 $N = 100$) 的决定系数 R^2 大于其他模型且均方根误差 RMSE 小于其他模型,因此选择该模型反演 2000—2014 年的产草量,其中 NDVI 为每年 5—9 月的平均值;产草量反演模型和精度验证如图 2。

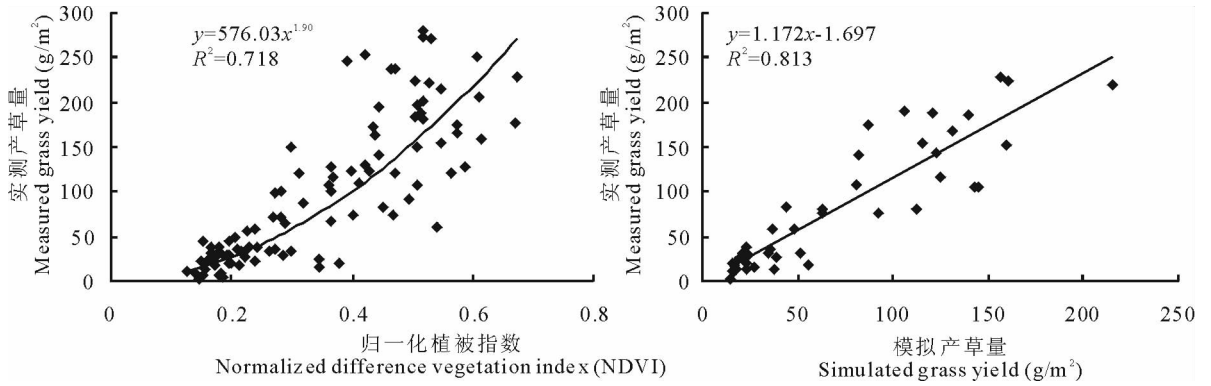


图 2 产草量反演模型和精度验证

Fig. 2 The retrieval model and accuracy verification of grass yield

2.2 土壤含水量遥感反演模型的建立和验证

2.2.1 土壤含水量与主要因子的相关性 通过分析各层土壤含水量(soil volumetric moisture, SVM)与归一化植被指数(NDVI)、地表温度(LST)和蒸散发(ET)的相关性,结果表明,归一化植被指数(NDVI)、地表温度(LST)和蒸散发(ET)与各层土壤含水量的相关性均为极显著相关($P < 0.01$),但各层相关系数的绝对值均表现为:蒸散发(ET) > 归一化植被指数(NDVI) > 地表温度(LST)(表 1)。

进一步分析常用的干旱监测指标与各层土壤含水量的相关性(表 2),结果表明距平植被指数(AVI)与各层土壤含水量的相关系数均为 0.11($P > 0.05$),相关性较低;植被状态指数(VCI)与各层土壤含水量均为低度相关($P < 0.05$);植被供水指数(VSWI)与各层土壤含水量均为极显著负相关($P < 0.01$),且随着土壤厚度的增加,相关性小幅上升;温度植被干旱指数(TVDI)与各层土壤含水量的相关性均为不显著($P > 0.05$),且相关系数均未达到 -0.1 ;基于实际蒸散发(ET)和潜在蒸散发(PET)计算的蒸散发亏缺指数(ETDI)与各层土壤含水量均为极显著高度负相关($P < 0.01$)。总体来看,各层相关系数的绝对值均表现为:蒸散发亏缺指数(ETDI) > 植被供水指数(VSWI) > 植被状态指数(VCI) > 距平植被指数(AVI) > 温度植被干旱指数(TVDI)。

2.2.2 土壤含水量反演模型及精度验证 通过以上分析可知,蒸散发亏缺指数(ETDI)与各层土壤含水量均为极显著高度负相关,因此选择蒸散发亏缺指数(ETDI)构建土壤含水量反演模型。各层分别用 273 个实测土壤含水量与蒸散发亏缺指数(ETDI)作回归分析,其散点图和线性回归模型如图 3 所示。

蒸散发亏缺指数(ETDI)与各层土壤含水量的线性回归分析表明,各层反演模型均达到极显著水平($P < 0.01$),各层回归模型的决定系数 R^2 由大到小的顺序为 30 cm > 20 cm > 10 cm > 50 cm,均方根误差 RMSE 由小

表 1 土壤含水量与干旱监测因子的 Pearson 相关分析

Table 1 Pearson correlation analysis of SVM and drought monitoring factors

土壤含水量 SVM	归一化植被 指数 NDVI	地表温度 LST	蒸散发 ET
0~10 cm	0.56**	-0.37**	0.68**
0~20 cm	0.59**	-0.39**	0.69**
0~30 cm	0.59**	-0.39**	0.69**
0~50 cm	0.57**	-0.36**	0.67**

注: * 表示显著相关($P < 0.05$), ** 表示极显著相关($P < 0.01$)。下同。

Note: * shows significant correlation ($P < 0.05$), ** shows extremely significant correlation ($P < 0.01$). SVM; Soil volumetric moisture; NDVI; Normalized difference vegetation index; LST; Land surface temperature; ET; Evapotranspiration. The same below.

表2 土壤含水量与干旱监测指标的 Pearson 相关分析

Table 2 Pearson correlation analysis of soil volumetric moisture and drought monitoring index

土壤含水量 SVM	距平植被指数 AVI	植被状态指数 VCI	植被供水指数 VSWI	温度植被干旱指数 TVDI	蒸散发亏缺指数 ETDI
0~10 cm	0.11($P=0.08$)	0.17*	-0.20**	-0.03($P=0.57$)	-0.76**
0~20 cm	0.11($P=0.07$)	0.16*	-0.22**	-0.02($P=0.69$)	-0.79**
0~30 cm	0.11($P=0.07$)	0.15*	-0.23**	-0.02($P=0.80$)	-0.79**
0~50 cm	0.11($P=0.08$)	0.15*	-0.23**	-0.00($P=0.99$)	-0.76**

AVI: Anomaly vegetation index; VCI: Vegetation condition index; VSWI: Vegetation supply water index; TVDI: Temperature vegetation dryness index; ETDI: Evapotranspiration deficit index. 下同。The same below.

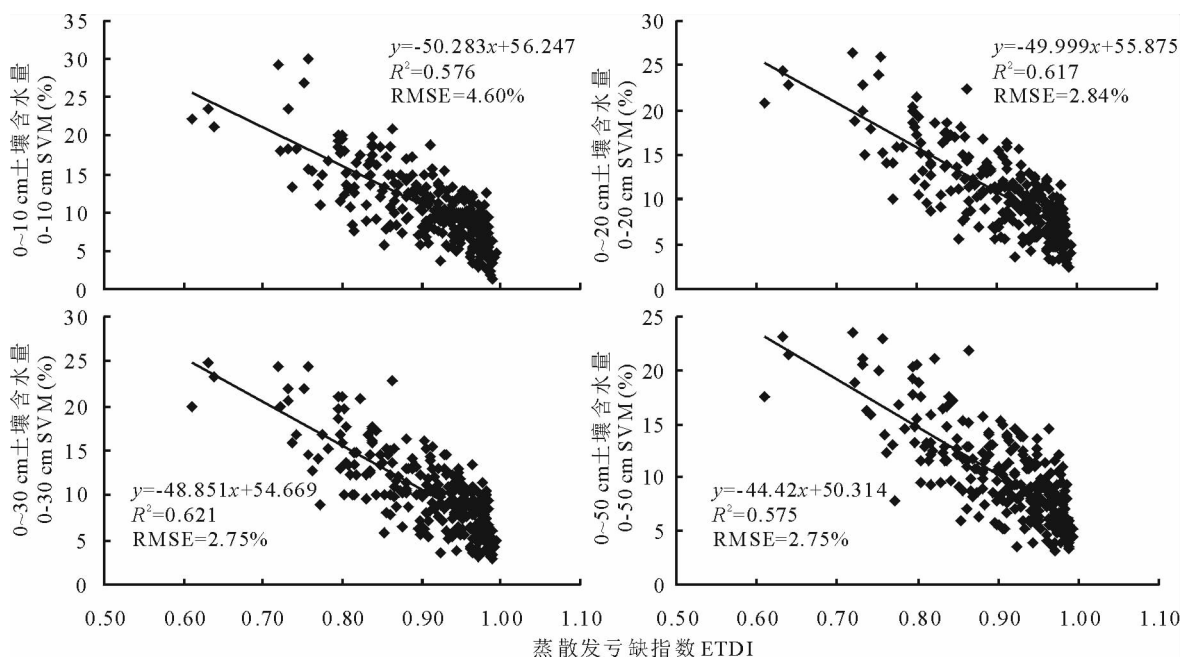


图3 蒸散发亏缺指数和土壤含水量散点图

Fig. 3 Scatter plots of evapotranspiration deficit index (ETDI) and soil volumetric moisture (SVM)

到大的顺序为 30 cm=50 cm<20 cm<10 cm,因此选择 0~30 cm 土壤含水量与蒸散发亏缺指数(ETDI)的线性回归模型 $SVM = -48.851 \times ETDI + 54.669$ 反演土壤含水量。将其余 118 个点的反演值与实测值比较,其均方根误差 RMSE 为 3.27%(图 4),说明该模型反演的土壤含水量与实测土壤含水量具有很好的一致性,达到了区域土壤含水量快速反演的应用水平。

2.3 锡林郭勒草原干旱监测

2.3.1 基于土壤含水量的干旱等级划分 通过模型 $SVM = -48.851 \times ETDI + 54.669$ 反演的是土壤体积含水量,国家气象干旱等级标准^[11]是基于土壤相对湿度划分干旱等级,因此为了划分该模型的干旱等级,利用锡林郭勒草原的土壤田间持水量和土壤容重,根据公式(7)反算了基于土壤体积含水量及相应的蒸散发

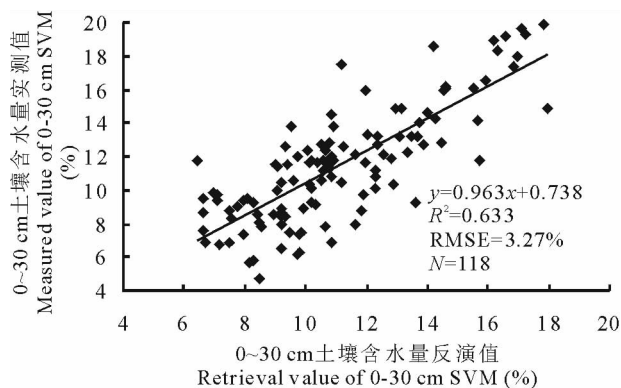


图4 土壤含水量模型精度验证

Fig. 4 Precision verification of SVM model

亏缺指数(ETDI)的干旱等级划分标准(表 3)。由于参与建模的实测土壤含水量是生长季 4—10 月的数据,因此

该土壤含水量反演模型和干旱等级划分标准主要适用于锡林郭勒草原 4—10 月的干旱监测及等级划分。

$$SVM = \frac{RMS \times SFC \times VWS}{\rho_w} \times 100\% \quad (7)$$

式中: SVM 为土壤体积含水量(%), RMS 为土壤相对湿度(%), SFC 为土壤田间持水量(%), VWS 为土壤容重(g/cm^3), ρ_w 为水的密度(g/cm^3)。

表 3 土壤含水量的干旱等级划分

Table 3 Drought grade classification based on SVM

等级 Grade	土壤相对湿度 Soil relative moisture (RMS, %)	土壤体积含水量 SVM (%)	蒸散发亏缺指数 ETDI	干旱影响程度 Degree of drought impact
无旱 Normal	RMS>60	SVM>12	ETDI<0.88	地表正常或湿润, 无旱象。The surface is normal or wet, no signs of drought.
轻旱 Slight drought	50<RMS≤60	10<SVM≤12	0.88<ETDI≤0.92	地表蒸发量较小, 近地表空气干燥。The surface evaporation is small and the surface air is dry.
中旱 Moderate drought	40<RMS≤50	8<SVM≤10	0.92<ETDI≤0.96	土壤表面干燥, 地表植物叶片有萎蔫现象。The surface of the soil is dry, the leaves of the plants are wilting.
重旱 Severe drought	30<RMS≤40	6<SVM≤8	0.96<ETDI<1	土壤干土层较厚, 地表植物萎蔫、叶片干枯。The soil dry layer was thicker, the surface plants were wilting and the leaves were dry.
特旱 Extreme drought	RMS≤30	SVM≤6	ETDI=1	基本无土壤蒸发, 地表植物干枯或死亡。Basically no soil evaporation, surface plant dry or dead.

2.3.2 近 15 年锡林郭勒草原干旱动态特征 应用土壤含水量反演模型 $SVM = -48.851 \times ETDI + 54.669$ 和干旱等级划分标准, 反演近 15 年(2000—2014 年)锡林郭勒草原 4—10 月的土壤含水量, 将每年生长期 4—10 月的土壤含水量求平均代表年度土壤含水量, 将各类草原所有像元的土壤含水量求平均代表该类草原的土壤含水量, 分析锡林郭勒草原的干旱年动态。

从时间尺度看(图 5), 近 15 年草甸草原的土壤含水量在 11.01%~15.92% 之间变化, 平均为 13.93%, 2007 年最小为 11.01%, 2012 年最大为 15.91%; 15 年中有 13 年(2000—2006 年、2008 年、2010—2014 年)无旱, 2 年轻旱(2007 和 2009 年), 无其他干旱等级, 说明草甸草原基本无旱。典型草原的土壤含水量在 9.07%~12.80% 之间变化, 平均值为 10.75%, 2007 年最小为 9.07%, 2012 年最大为 12.80%; 15 年中有 3 年(2002、2003 和 2012 年)无旱, 3 年(2006、2007 和 2009 年)中旱, 其余 9 年轻旱, 说明典型草原基本为轻旱。沙地植被的土壤含水量在 9.23%~12.88% 之间变化, 平均值为 10.58%, 2009 年最小为 9.23%, 2003 年最大为 12.88%; 15 年中有 1 年(2003 年)无旱, 10 年(2000—2002 年、2004 年、2008 年、2010—2014 年)轻旱, 4 年(2005—2007 年、2009 年)中旱, 说明沙地植被基本为轻旱或中旱, 且轻旱发生频率较高。荒漠草原的土壤含水量在 7.04%~9.00% 之间变化, 平均值为 7.89%, 2005 年最小为 7.04%, 2003 年最大为 9.00%; 15 年中有 5 年(2002—2003 年、2008 年、2012—2013 年)中旱, 其余 10 年为重旱, 说明荒漠草原基本为中重旱等级, 且重旱发生频率较高。总体而言, 研究区土壤含水量在 9.44%~12.89% 之间

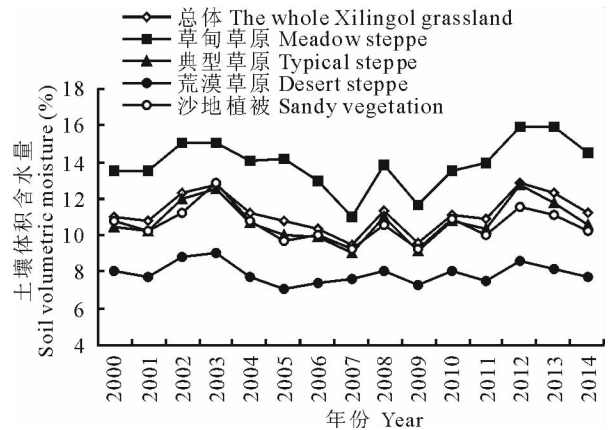


图 5 各类草原土壤含水量变化

Fig. 5 SVM changes in different types of grassland

总体而言, 研究区土壤含水量在 9.44%~12.89% 之间

变化,平均为 11.21%,2007 年最小为 9.44%,2012 年最大为 12.89%;15 年中有 4 年(2002—2003 年、2012—2013 年)无旱,9 年(2000—2001 年、2004—2006 年、2008 年、2010—2011 年、2014 年)轻旱,2 年(2007 和 2009 年)中旱,说明锡林郭勒草原基本为轻旱。

各类草原的土壤含水量变化趋势相近,均在 2003、2008 和 2012 年出现波峰,2001 和 2009 年出现波谷,2007 年除荒漠草原外其余各类草原均为波谷。近 15 年草甸草原、典型草原和总体的土壤湿度均有增加趋势,沙地植被和荒漠草原的土壤湿度均有减小趋势,但变化均不显著($P>0.05$)。

从空间分布上看,各年土壤含水量都表现出由东北和东南向西南递减的规律,草甸草原土壤含水量最大,基本为无旱或轻旱;典型草原和沙地植被次之,基本为轻旱或中旱;荒漠草原土壤含水量最小,基本为重旱;近 15 年各类草原均未发生特旱(图 6)。

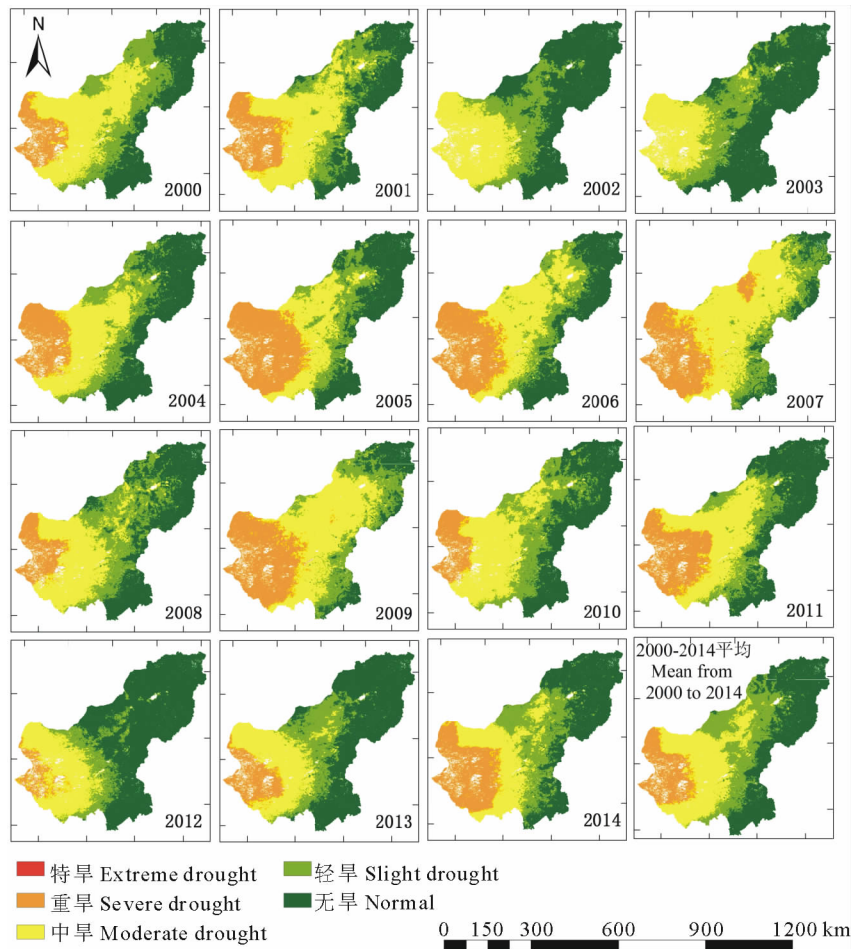


图 6 锡林郭勒草原 2000—2014 年干旱等级空间分布

Fig. 6 Spatial distribution of drought in Xilingol grassland from 2000 to 2014

2.3.3 各等级干旱面积变化及对产草量的影响 通过对各年各等级干旱面积的统计可知(表 4),近 15 年平均来看,锡林郭勒草原无旱面积为 6.62 万 km^2 ,占总面积的 34.05%;轻旱和中旱分别为 4.13 和 5.83 万 km^2 ,占总面积的 21.24%和 30.00%;重旱面积为 2.86 万 km^2 ,占总面积的 14.71%,说明锡林郭勒草原平均约 66%的面积存在不同程度的干旱。近 15 年无旱和重旱面积呈增加趋势,轻旱和中旱面积均呈减少趋势,但变化均不显著($P>0.05$)。

从各年空间分布来看(图 6,表 4),2002、2003、2012 和 2013 年的无旱面积较大,其中 2012 年的无旱面积最大;2003 和 2012 年的无旱面积分别占总面积的 52.28%和 57.99%,中旱分别占总面积的 22.56%和 23.32%,重

旱分别占总面积的 0.06% 和 4.48%，中旱和重旱面积均较低，因此 2003 和 2012 年为 2000—2014 年间较典型的丰年。

2004、2008、2010、2011 和 2014 年各等级的面积均与多年平均值较接近，其中 2004 和 2010 年无旱分别占总面积的 35.27% 和 33.99%，中旱分别占总面积的 28.35% 和 31.20%，重旱分别占总面积的 15.44% 和 9.60%，均与多年平均值接近，因此 2004 和 2010 年为 2000—2014 年间较典型的平年。

2000、2001、2005、2006、2007 和 2009 年的无旱面积均低于多年平均水平，其中 2005 年的重旱面积最大，占总面积的 29.07%；2007 和 2009 年的无旱面积最小，分别占总面积的 10.02% 和 12.87%，中旱面积百分比分别为 46.45% 和 39.41%，均高于其余年份；重旱面积百分比均较高，分别为 24.27% 和 27.09%，因此 2007 和 2009 年为 2000—2014 年间较典型的旱年。

近 15 年锡林郭勒草原的产草量和土壤含水量的波动变化曲线具有很强的一致性(图 7)，二者呈极显著正相关($P < 0.01$)，相关系数为 0.86，且均在 2001、2007 和 2009 年出现波谷，在 2003、2008 和 2012 年出现波峰。丰年 2003 和 2012 年的平均产草量比平年 2004 和 2010 年的平均产草量上涨约 35%，而旱年 2007 和 2009 年的平均产草量比平年 2004 和 2010 年的平均产草量下降约 20%。

近 15 年锡林郭勒草原的土壤含水量和年降水量的波动变化曲线具有很强的一致性(图 7)，二者呈极显著正相关($P < 0.01$)，相关系数为 0.77，且均在 2001、2007、2009 和 2011 年出现波谷，在 2003、2008、2010 和 2012 年出现波峰。

表 4 各等级干旱面积百分比

Table 4 The percentage of drought area of each grade %

年份 Year	无旱 Normal	轻旱 Slight drought	中旱 Moderate drought	重旱 Severe drought	合计 Total
2000	29.55	24.76	35.64	10.05	100
2001	27.05	21.62	35.18	16.15	100
2002	48.47	22.60	28.89	0.04	100
2003	52.28	25.10	22.56	0.06	100
2004	35.27	20.94	28.35	15.44	100
2005	29.97	18.12	22.84	29.07	100
2006	26.87	17.34	31.16	24.63	100
2007	10.02	19.26	46.45	24.27	100
2008	34.05	27.28	28.94	9.73	100
2009	12.87	20.63	39.41	27.09	100
2010	33.99	25.21	31.20	9.60	100
2011	32.98	17.10	29.78	20.14	100
2012	57.99	14.21	23.32	4.48	100
2013	45.69	20.64	23.88	9.79	100
2014	33.63	23.78	22.43	20.16	100
平均 Mean	34.05	21.24	30.00	14.71	

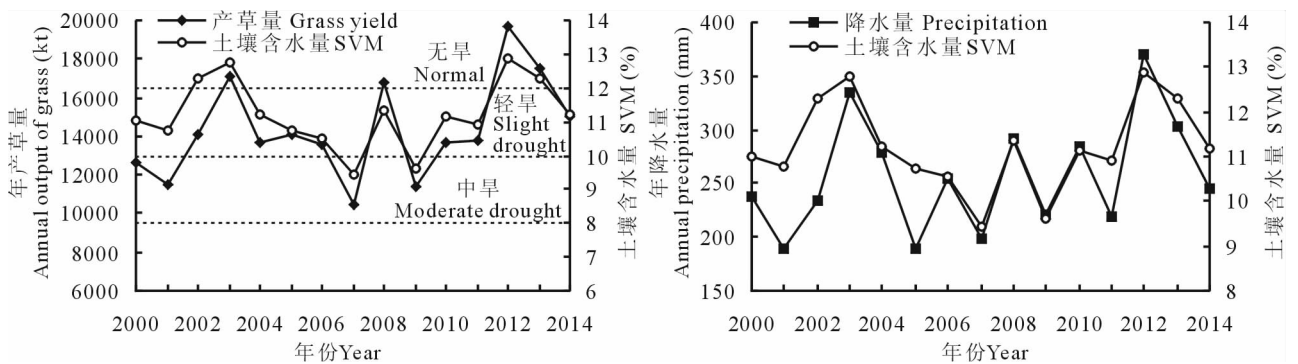


图 7 土壤含水量与产草量及降水量变化

Fig. 7 The changes of SVM and grass yield and precipitation

3 讨论与结论

本研究表明，常用的遥感干旱监测因子归一化植被指数(NDVI)、地表温度(LST)和蒸散发(ET)与各层土壤含水量的相关性均为极显著相关，相关性由大到小排序为：蒸散发(ET) > 归一化植被指数(NDVI) > 地表温度

(LST);常用的干旱监测指标与各层土壤含水量的相关性由大到小表现为:蒸散发亏缺指数(ETDI) > 植被供水指数(VSWI) > 植被状态指数(VCI) > 距平植被指数(AVI) > 温度植被干旱指数(TVDI),说明蒸散发及蒸散发亏缺指数能够很好地表征土壤含水量;前期研究结果表明年蒸散发量与年降水量和年平均植被指数均为极显著正相关^[15],3-10月及春季、夏季和秋季的ET与NDVI和降水量显著正相关^[16],这与本研究中蒸散发与各层土壤含水量均为极显著正相关的结论相辅相成,即降水量越大、土壤含水量越高、植被长势越好,NDVI值越大,土壤和植被的蒸散发量越大。

通过野外调查发现,锡林郭勒草原草本根系主要分布在0~30 cm深度,局部地区草本根系分布在0~50 cm深度,总体来说钙积层较浅,因此0~30 cm深度的土壤含水量对植被的生长具有重要意义。本研究分析结果表明0~30 cm深度的土壤含水量与蒸散发亏缺指数(ETDI)的回归模型 $SVM = -48.851 \times ETDI + 54.669$ ($R^2 = 0.62, RMSE = 2.75\%$),其决定系数 R^2 最大且均方根误差RMSE最小,模型的均方根误差为3.27%,反演值与实际情况较符,达到了区域土壤含水量快速反演的应用水平。

近15年锡林郭勒草原干旱年动态表明,各年土壤含水量都表现出由东北和东南向西南递减的规律,草甸草原的土壤含水量在14%上下波动,基本为无旱,只有2007和2009年发生轻旱;典型草原、沙地植被和总体的土壤含水量在11%上下波动,基本为轻旱,只有2007和2009年发生中旱;荒漠草原的土壤含水量在8%上下波动,基本为重旱等级,只有2002、2003和2012年为中旱。近15年锡林郭勒草原平均约66%的面积存在不同程度的干旱,无旱和重旱面积呈增加趋势,轻旱和中旱面积呈减少趋势,但变化均不显著($P > 0.05$)。乌云高娃^[17]的研究结果表明锡林郭勒盟东部及南部地区如东乌珠穆沁旗、多伦县等地的干旱发生频率较低,中部地区如阿巴嘎旗、锡林浩特市等地的干旱强度较轻,西部地区如二连浩特市、苏尼特右旗和苏尼特左旗等地为干旱发生频率较高且强度较强的地区,本研究结果与此相符。

近15年锡林郭勒草原的土壤含水量和产草量及年降水量的波动变化曲线具有很强的一致性,丰年2003和2012年的平均产草量比平年2004和2010年的平均产草量上涨约35%,而旱年2007和2009年的平均产草量比平年2004和2010年的平均产草量下降约20%,刚嘎玛^[18]的研究结果也表明锡林郭勒盟2009年的干旱程度比2010年严重。锡林郭勒草原干旱发生的主要原因与周期性或偶发性的降水减少有关,但由于降水分布的时空不均等特征,导致相近的年降水量干旱程度不同,影响产草量的程度也不同,如2001、2005和2011年虽然降水量较少,但其产草量均高于典型旱年2007和2009年。

参考文献 References:

- [1] Wilhite D. Drought as a natural hazard: Concepts and definitions. *Drought, A Global Assessment*, 2000, 1: 3-18.
- [2] Chen W Y, Xiao Q G, Sheng Y W. Application of the anomaly vegetation index to monitoring heavy drought in 1992. *Remote Sensing of Environment China*, 1994, 9(2): 106-112.
陈维英,肖乾广,盛永伟. 距平植被指数在1992年特大干旱监测中的应用. *环境遥感*, 1994, 9(2): 106-112.
- [3] Kogan F N. Remote sensing of weather impacts on vegetation in non-homogeneous areas. *International Journal of Remote Sensing*, 1990, 11(8): 1405-1419.
- [4] Kogan F N. Application of vegetation index and brightness temperature for drought detection. *Advances in Space Research*, 1995, 15(11): 91-100.
- [5] Sandholt I, Rasmussen K, Andersen J. A simple interpretation of the surface temperature/vegetation index space for assessment of surface moisture status. *Remote Sensing of Environment*, 2002, 79(2): 213-224.
- [6] Cai G Y, Du M Y, Liu Y. Regional drought monitoring and analyzing using MODIS data—a case study in Yunnan Province. *Ifip Advances in Information & Communication Technology*, 2010, 345: 243-251.
- [7] Wang P X, Gong J Y, Li X W. Vegetation temperature condition index and its application for drought monitoring. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2001, 26(5): 412-418.
王鹏新,龚健雅,李小文. 条件植被温度指数及其在干旱监测中的应用. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2001, 26(5): 412-418.
- [8] Guo Y, Shen Y J, Zhao C. Soil moisture monitoring in agricultural lands via active-passive microwave remote sensing. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2011, 19(5): 1162-1167.

郭英, 沈彦俊, 赵超. 主被动微波遥感在农区土壤水分监测中的应用初探. 中国生态农业学报, 2011, 19(5): 1162-1167.

- [9] Yuan X, Ma Z G, Pan M. *et al.* Microwave remote sensing of short-term droughts during crop growing seasons. *Geophysical Research Letters*, 2015, 42(11): 4394-4401.
- [10] Keshavarz M R, Vazifedoust M, Alizadeh A. Drought monitoring using a soil wetness deficit index (SWDI) derived from MODIS satellite data. *Agricultural Water Management*, 2014, 132(2): 37-45.
- [11] National Standard of People's Republic of China. The Grade of Meteorological Drought: GB/T 20481-2006[S]. Beijing: China Standard Press, 2006.
中华人民共和国国家标准. 气象干旱等级: GB/T 20481-2006[S]. 北京: 中国标准出版社, 2006.
- [12] Editorial Board of Geography Volume of the Encyclopedia of Mongolian Studies. The Encyclopedia of Mongolian Studies: Geography Volume[M]. Hohhot: Inner Mongolia People's Publishing House, 2012.
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.
- [13] Editorial Board of Xilingol League Chronicles. Xilingol League Chronicles (Book One)[M]. Hohhot: Inner Mongolia People's Publishing House, 1996.
锡林郭勒盟志编纂委员会. 锡林郭勒盟志(上)[M]. 呼和浩特: 内蒙古人民出版社, 1996.
- [14] Narasimhan B, Srinivasan R. Development and evaluation of soil moisture deficit index (SMDI) and evapotranspiration deficit Index (ETDI) for agricultural drought monitoring. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2005, 133(1): 69-88.
- [15] Zhang Q F, Liu G X, Yu H B, *et al.* Temporal and spatial dynamic of ET based on MOD16A2 in recent fourteen years in Xilingol steppe. *Acta Agrestia Sinica*, 2016, 24(2): 286-293.
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. 草地学报, 2016, 24(2): 286-293.
- [16] Zhang Q F, Liu G X, Yu H B, *et al.* Monthly and seasonal dynamics of evapotranspiration in Xilingol steppe and related factors analysis. *Research of Soil and Water Conservation*, 2017, 24(3): 164-169.
张巧凤, 刘桂香, 于红博, 等. 锡林郭勒草原蒸散发月季动态及相关因子分析. 水土保持研究, 2017, 24(3): 164-169.
- [17] Wuyun G W. Study on Meteorological Drought in Xilingol League Based on Microwave Remote Sensing[D]. Hohhot: Inner Mongolia Normal University, 2014.
乌云高娃. 基于微波遥感的锡林郭勒盟气象干旱研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古师范大学, 2014.
- [18] Gang G M. Drought Monitoring and Prediction Research Based on RS and GIS Technology of Xilingol League[D]. Hohhot: Inner Mongolia Normal University, 2012.
刚嘎玛. 基于遥感与 GIS 技术的锡林郭勒盟干旱监测与预警研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古师范大学, 2012.