

2002—2016 年锡林郭勒草原干旱时空特征

杜波波, 阿拉腾图娅, 包刚

(内蒙古师范大学 地理科学学院, 呼和浩特 010022)

摘要:随着气候变暖, 干旱越发普遍, 关于干旱的研究一直是国内外学者关注的热点。采用 MODIS 产品数据计算温度植被干旱指数 TVDI, 反演 2002—2016 年锡林郭勒草原植被生长期土壤干湿状况, 对干旱的时空分布特征进行了研究。结果表明: 锡林郭勒草原在各时相几乎都处于一种干旱的状态, 但主要以轻旱和中旱为主, 重旱现象较少。从时间上看, 6 月、8 月和 9 月份易出现大规模干旱, 中旱占较大比例, 而 7 月、10 月上旬容易发生大面积的轻旱。空间上, 西部地区以轻旱为主, 中旱及重旱现象较少; 中东部、南部地区干旱事件的发生频率较高, 且大面积的中旱及局部的重旱现象较为普遍; 中部及北部地区也常常会发生不同等级的干旱现象, 出现严重干旱的频率也较高。

关键词:干旱时空分布; 锡林郭勒草原; 温度植被干旱指数

中图分类号: TP79; S152.7; Q948.15

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2019)04-0190-05

Temporal and Spatial Characteristics of Drought in the Xilingol Grassland From 2002 to 2016

DU Bobo, Alatengtuya, BAO Gang

(College of Geographical Science, Inner Mongolia Normal University, Hohhot 010022, China)

Abstract: With the climate warming, drought is becoming more and more common. The study on the drought has been a hotspot for decades worldwide. The temperature and vegetation dryness index was calculated using the MODIS products to evaluate the temporal and spatial characteristics of drought in the Xilingol grassland from 2002 to 2016. The results showed that the Xilingol grassland was in drought at all phases, but mainly in light drought and moderate drought with less severe drought; temporally, the large-scale of moderate drought was prone to occur in June, August and September; the light drought occurred widely in July and the first half of October; spatially, the light drought mainly occurred in the western area, while large scale of moderate drought and regional severe drought were found in the middle of east and southern part of the study area. Different levels of drought were also occurred in the central and northern Xilingol, where severe drought was frequent.

Keywords: spatial and temporal distribution of drought; Xilingol grassland; temperature vegetation dryness index

干旱是一种极其普遍、影响程度极深的累积性自然灾害, 全球约 2/3 的国家受干旱的影响, 干旱造成了巨大的经济损失。随着气候的变化, 全球的温度和降水在时间和空间上发生了一系列变化, 极端干旱也更加频繁^[1], 干旱产生的土地退化 and 水资源短缺等问题已成为制约经济发展、威胁人类生存的最严重问题。蒙古高原位于亚欧大陆内部, 降水稀少, 为干旱提供了良好的孕育环境, 气温的上升导致蒙古高原在进入 21 世纪后一直处于一种持续干旱的状态^[2]。锡林郭勒草原地

处蒙古高原东南部, 干旱的连年发生, 对区域生态建设、当地居民可持续发展产生了严重影响, 因此进行锡林郭勒草原干旱的时空特征研究, 找出干旱的发生规律, 对区域经济发展, 构建保卫京畿重地的绿色长城, 提高当地居民的幸福指数具有重大意义。

在过去几十年里, 国内学者采用了不同的研究方法对干旱的时空分布状况进行研究^[3-7], 关于干旱特征研究的方法可以总结为两类: 基于气象站数据的干旱指标评价方法和基于遥感影像数据的干旱反演。

收稿日期: 2018-09-12

修回日期: 2018-09-28

资助项目: 内蒙古自然科学基金(2017MS0402); 内蒙古自治区研究生教育创新计划资助项目(CXJJS1898); 内蒙古师范大学研究生科研创新基金资助项目(CXJJS1898)

第一作者: 杜波波(1993—), 男, 内蒙古包头人, 研究生, 研究方向为资源与环境遥感。E-mail: 939429194@qq.com

通信作者: 阿拉腾图娅(1969—), 女(蒙古族), 内蒙古呼和浩特人, 硕士, 教授, 主要从事资源与环境遥感研究。E-mail: altty@imnu.edu.cn

基于气象站数据的干旱指标评价方法由于计算过程简单易行,在我国被大多数学者所认可,以往关于长时间序列的干旱时空特征分析也主要是利用这种方法^[4-6]。然而该方法往往存在一些缺陷:首先,气象站点数量有限、空间分布特征不均匀,无法实现大面积的干旱监测^[7],尽管近几年气象站点的密度有所增加,但是对以往气象数据的亏缺却是无法弥补的。随着遥感技术的快速发展,遥感影像为研究人员提供了大量的数据,除了一些特别的遥感数据需要付费,大多数数据都能免费获取。通过遥感影像可以快速实现大面积土壤干湿度的检测,提高了时效性,使区域干旱预防、治理更具有科学性。但是利用遥感数据处理过程比较繁琐,工作量大,所以基于遥感数据进行长时间序列的干旱监测的研究比较少^[8],目前使用遥感数据进行干旱研究主要集中在短时间的干旱监测或传感器之间的精度验证上^[9-11]。

针对以上存在的问题,本文利用 MODIS 产品数据构建的温度植被干旱指数 TVDI,从月尺度上分析 2002—2016 年锡林郭勒草原生长季的干旱时空分布特征,找出干旱在时间上的变化规律和空间上的分布特征,为区域干旱的预防、治理提供参考。

1 数据与方法

1.1 研究区概况

锡林郭勒草原地处内蒙古自治区中部,115°13′—117°06′E,43°02′—44°52′N,属于温带大陆性气候,降水 140~400 mm,年均温度 0~4℃。全盟水资源总量为 34.92 亿 m³/a,地表水资源 9.08 亿 m³/a,可利用量为 3.98 亿 m³。全区人口达 104.69 万,牧区人口大概占总人口的 1/5,主要收入以畜牧业为主,经济类型单一。干旱以及由干旱所引起的一系列次生事件是限制牧区发展的主要因素,进行实时有效的干旱监测并做出合理的干旱等级评估,可以降低区域的经济损失。

1.2 数据来源

研究所用的遥感影像数据来源于美国航空航天局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)。具体包括 2002—2016 年研究区生长季内(第 113~288 天)^[12-13] Terra 卫星的地表温度数据 MOD11A2 和植被指数数据 MOD13A2。空间分辨率为 1 000 m,时间分辨率 MOD11A2 为 8 d,MOD13A2 为 16 d,采用最大值合成法将地表温度数据合成为 16 d 的数据,并对影像进行镶嵌、投影转换,在 IDL 中进行批量裁剪。

研究中用到的气象数据来自中国气象资料共享网,标准化降水指数 SPI 的计算所需数据最少为 30 a^[14],所

以研究中选取 1987—2016 年 30 a 的月尺度降水,空间上包括锡林郭勒 9 个气象站点(图 1)。

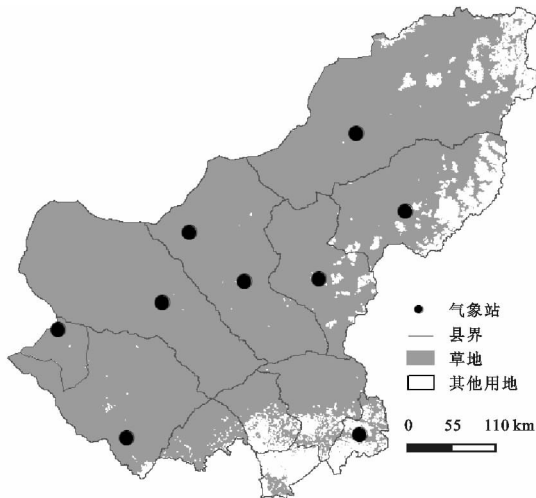


图 1 锡林郭勒草原位置

1.3 研究方法

研究中的温度植被干旱指数(TVDI)是利用 MODIS 遥感影像产品数据地表温度数据(LST)和植被指数(NDVI)拟合而成的,与土壤的干湿状况具有较强的相关性^[15]。相比传统的监测方法能够快速实现对大面积土壤的干旱监测,较好地反映土壤的干湿状况^[16-17];相比单纯使用 LST 或 NDVI 反演的干旱状况,TVDI 降低了 LST 受大气、环境等因素对监测精度影响,同时弥补了 NDVI 对干旱监测在时间上滞后的问题,较为精确地反映了地表含水量的变化状况^[18-19]。TVDI 计算公式如下:

$$TVDI = \frac{LST - LST_{min}}{LST_{max} - LST_{min}} \quad (1)$$

式中:LST_{max}表示像元在某个 NDVI 值时的最大温度,LST_{min}代表最小温度,最大温度值拟合公式:LST_{max}=a₁+b₁NDVI,最小温度值的拟合公式:LST_{min}=a₂+b₂NDVI;a₁,b₁代表干边的拟合系数,a₂,b₂代表湿边的拟合系数。

温度植被干旱指数(TVDI)位于(0,1),TVDI 值越大,表示越干旱,具体划为 5 个等级:

表 1 温度植被干旱指数等级划分

项目	干旱等级				
	1	2	3	4	5
干旱类型	湿润	正常	轻旱	中旱	重旱
温度植被干旱指数	0~0.2	0.2~0.4	0.4~0.6	0.6~0.8	0.8~1.0

2 结果与分析

2.1 结果与分析

2.1.1 精度验证 研究中利用 SPI 与 TVDI 进行相互验证。计算 SPI 所用的气象数据为 1987—2016 年锡林郭勒草原 9 个气象站的月尺度降水,在计算结果中提取 2002—2016 年 6—9 月各气象站点对应的

SPI 值。将 16 d 尺度的 TVDI 通过求平均合成月尺度的 TVDI 值,提取各站点对应的 TVDI 像元值。共获取 540 对 SPI—TVDI 样本点,对各站点的 SPI 和 TVDI 值进行分等定级,在 SPSS 软件中计算 SPI—TVDI 肯德尔等级相关系数:在 0.01 的置信度下, SPI—TVDI 的肯德尔等级相关系数为-0.369。说明 TVDI 与 SPI 干旱等级呈负相关性,这符合标准化降水指数值越大越湿润,值越小越干旱;也符合温度植

被干旱指数值越小越湿润,值越大越干旱的规律。

2.1.2 干旱在植物生长期的时间特征分析 对 2002—2016 年干旱面积比例进行统计,绘制图 2。从图 2A 中可以看出,锡盟草原在生长季内发生的干旱现象主要分为 3 个等级:轻旱、中旱、重旱,其中重旱在各时相中所占的面积比例都比较小,中旱次之,轻旱所占的面积比例都比较大,由此可以判定锡林郭勒草原干旱主要以轻旱和中旱为主。

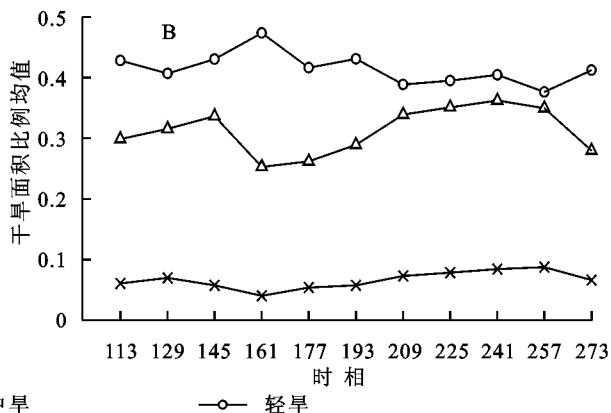
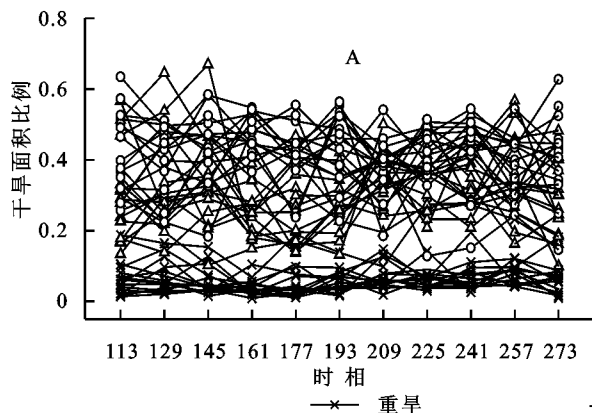


图 2 2002—2016 年锡林郭勒草原在生长季内各等级干旱面积比例

由图 2B 可知,4 月下旬—6 月上旬轻旱的面积比例呈递增趋势,在 6 月中旬轻旱面积比例达到峰值,6 月下旬—10 月上旬轻旱面积在部分时间段内有所起伏,但整体上呈现一种递减趋势。中旱面积在 4 月下旬—5 月下旬处于上升阶段,在 5—6 月上旬首次达到峰值,在 6 月中旬中旱面积比例发生逆转降到最低,之后从 6 月下旬中旱面积比例一直处于上升状态,特别是进入 8 月份后出现持续性的大面积中旱现象,这种状态直到 9 月底才出现回转。重旱的面积比例基本上处于一个较为平稳的状态,4 月底—6 月上旬重旱面积比例整体呈递减趋势,只是在 5 月中旬出现第一个峰值;从 6 月中旬开始重旱整体上呈递增的趋势,但是增幅不大,这种状态直到 9 月底才出现回落。当轻旱面积比例增加时,中旱和重旱的面积比例则减少,当轻旱面积比例下降时,中旱和重旱的面积比例反而增加,说明锡林郭勒草原在生长季内发生干旱的草地面积比例基本保持不变,只是各种干旱面积比例此消彼长。

从图 3 中可以看出,4 月下旬—5 月底、7 月上旬、9 月下旬发生中旱的面积比例波动比较大,说明这几个时间段发生干旱的面积比例不稳定,在个别年份里容易出现大面积中旱。轻旱面积比例整体波动不大,只是在 4 月下旬、5 月底—6 月上旬、7 月中下旬、9 月上半月、10 月上半月离散度大于 0.1,这几个时相相比其他时间段轻旱发生的面积比例不稳定。重旱面积比例出现较大波动主要集中在 8 月下旬—9

月中旬,说明这个时间段容易出现较大或较小面积比例的重旱,其他时相都比较稳定。6 月中下旬轻旱、中旱和重旱的面积比例相比其他时间段内的波动不大,表明这个时间段内发生的各等级干旱面积比例基本不变。从总体上看,3 种程度的干旱面积比例离散度较小,波动变化不是特别大,说明各时相各等级的干旱面积只是在小幅度范围内发生变化。

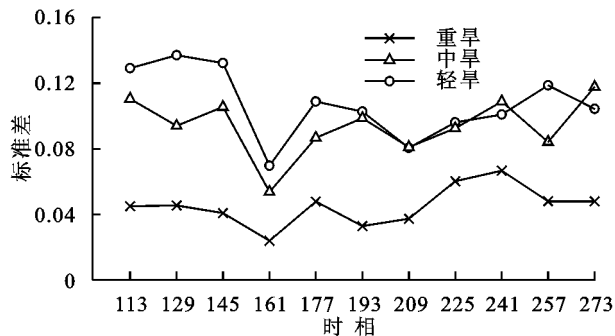


图 3 2002—2016 年锡林郭勒草原各时相干旱面积比例标准误差

2.1.3 干旱在植物生长期的空间特征分析 从整体上看,锡林郭勒草原发生干旱的频率较高,轻旱属于极普遍的干旱现象,几乎在每年的每个时相都出现大面积的轻旱现象;中旱在 15 a 的研究时间段内发生频率较高且影响范围较大;重旱发生的面积比较小,但局部重旱现象出现的频率较高。

通过对图 4 的分析发现,全区在生长季的各时间段都有干旱现象发生。中东部地区在各个时相都属于干旱发生频率较高的区域,此处植物生长季曾多

次发生大面积的中旱,这也再一次验证了上文的分析,中东部发生干旱的频率及发生干旱的严重程度较高。西南地区在各时相干旱发生的概率也比较高,这一地区发生中旱或重旱的可能性较大。



图 4 锡林郭勒草原在 2002—2016 年生长季内的土壤干湿状况、累积时空分布

综上所述,2002—2016 年锡林郭勒草原生长季的干旱空间分布特征可总结为:西部地区以轻旱为主,中旱及重旱现象较少;中东部地区干旱事件的发生频率较高,且大面积的中旱及局部的重旱现象较为

普遍;南部地区的干旱频率也较高,一旦发生干旱,出现严重干旱现象的概率也比较高;中间北部地区也常常会发生不同等级的干旱现象,其出现严重干旱的频率也较高。

3 讨论

本文利用 SPI 与 TVDI 进行相互验证,结果证明 TVDI 能够较好地反映锡林郭勒草原的干湿程度,相关文献^[18,20]也证明了 TVDI 对锡林郭勒草原土壤干湿状况的反演具有较高的适用性,文献^[18]对 2010 年锡林郭勒草原 9 月的干湿状况进行了检测,与本文对该时间段内的干湿状况的检测结果相似:2010 年 9 月份的干旱主要集中在东部地区,西部地区干旱强度较小。将本文的检测结果与基于 SPI 的研究成果进行对比发现^[21-23],本文得出的干旱时空分布特征与前人的研究结果具有一致性,干旱主要以轻旱和中旱为主,干旱发生的频率较高,只是在部分地区的干旱反演上存在偏差,但基于 TVDI 的遥感监测方法使区域干旱时空分布的细节问题更加突出,主要由于传统的气象数据只是基于气象站点进行分析,而遥感数据监测方法则是逐像元进行计算,在一定程度上提高了检验精度,克服了传统监测过程中以点概面的缺陷。

2002—2016 年锡林郭勒草原植物生长期,干旱现象较为普遍,主要是由于在过去的十几年锡林郭勒草原夏季降水量呈下降趋势^[24],导致锡林郭勒草原在植被生长期出现较为频繁的干旱现象。此外,在计算温度植被干旱指数的过程中可能存在一些不足:首先直接将 16 d 尺度的 TVDI 通过计算平均值合成月尺度的 TVDI 可能会存在一定的误差;其次,锡林郭勒草原由多种植被景观构成,不同的土地覆被类型对 TVDI 的计算结果会产生不同的影响^[7],尤其是荒漠草原,植被覆盖度较低,对 TVDI 的计算结果会产生较大的影响,对于这两个问题在今后的研究中应当提出合理的解决方案。

4 结论

(1) 2002—2016 年整个生长季内全区轻旱现象及其普遍,大面积的干旱现象在各个时相都有发生,6 月、8 月、9 月会出现大面积的轻旱和中旱现象,7 月、10 月上旬容易出现大规模的轻旱现象,9 月份出现大面积中旱事件的可能性较高,在各个时相几乎都会出现大面积的干旱,其中轻旱、中旱占较大比例。

(2) 从空间尺度上分析,研究区域中东部地区属于干旱发生频率较高的区域,且常常伴有大面积的中旱和局部的重旱的发生。中间地区在生长季常常会发生较

大面积干旱,但主要以轻旱为主;北部地区出现中旱的频率较高,局部性干旱在每年各个时相里都有发生,也都以轻旱、中旱为主;西部地区在生长季始终处于一种干旱状态,发生干旱的频率较高,无旱时期较少,主要以轻旱和中旱为主,重旱较少。南部地区也常有干旱事件的发生,大面积中旱和局部重旱发生频率较高。

参考文献:

- [1] 张强,韩兰英,张立阳,等.论气候变暖背景下干旱和干旱灾害风险特征与管理策略[J].地球科学进展,2014,29(1):80-91.
- [2] Hessel A E, Anchukaitis K J, Jelsema C, et al. Past and future drought in Mongolia[J]. Science Advances, 2018,4(3):e1701832.
- [3] 杨建玲,冯建民,穆建华,等.西北地区东部季节干旱的时空变化特征分析[J].冰川冻土,2013,35(4):949-958.
- [4] 胡实,莫兴国,林忠辉.未来气候情景下我国北方地区干旱时空变化趋势[J].干旱区地理,2015,38(2):239-248.
- [5] 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.
- [6] 赵安周,刘宪锋,朱秀芳,等.基于 SWAT 模型的渭河流域干旱时空分布[J].地理科学进展,2015,34(9):1156-1166.
- [7] 张喆,丁建丽,李鑫,等. TVDI 用于干旱区农业旱情监测的适宜性[J].中国沙漠,2015,35(1):220-227.
- [8] 何慧娟,卓静,李红梅,等.基于 MOD16 产品的陕西关中地区干旱时空分布特征[J].干旱地区农业研究,2016,34(1):236-241.
- [9] 柳锦宝,何政伟,段英杰. MODIS 数据支持下的西藏干旱遥感监测[J].干旱区资源与环境,2013,27(6):134-139.
- [10] 何建村,白云岗,张严俊.基于 MODIS 数据新疆土壤干旱特征分析[J].干旱区地理,2015,38(4):735-742.
- [11] 聂娟,邓磊,郝向磊,等.高分四号卫星在干旱遥感监测中的应用[J].遥感学报,2018,22(3):400-407.
- [12] 郭剑,陈实,徐斌,等.基于 SPOT-VGT 数据的锡林郭勒盟草原返青期遥感监测[J].地理研究,2017,36(1):37-48.
- [13] 刘红海,王宏,李晓兵,等.内蒙古温带典型草原物候期的变化研究[J].北京师范大学学报:自然科学版,2016,52(4):512-517,406,537.
- [14] 王芝兰,王劲松,李耀辉,等.标准化降水指数与广义极值分布干旱指数在西北地区应用的对比分析[J].高原气象,2013,32(3):839-847.
- [15] Patel N R, Anapashsha R, Kumar S, et al. Assessing potential of MODIS derived temperature/vegetation condition index (TVDI) to infer soil moisture status[J]. International Journal of Remote Sensing, 2009,30(1):23-39.

- [11] 周磊,武建军,吕爱峰,等. 华北不同地表覆盖类型区干旱演变特征[J]. 地理研究, 2012, 31(4): 597-607.
- [12] 安华. 华北地区旱涝时空变化特征及趋势判断[D]. 西安: 陕西师范大学, 2013.
- [13] 刘文莉, 张明军, 王圣杰, 等. 近 50 年来华北平原极端干旱事件的时空变化特征[J]. 水土保持通报, 2013, 33(4): 90-95.
- [14] 国家气象信息中心. 中国地面降水 $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$ 格点数据集 (V2.0) 评估报告[R]. 北京: 国家气象信息中心, 2012.
- [15] Liu N, Wang H, Ling T J, et al. The influence of ENSO on sea surface temperature variations in the China seas[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2013, 32(9): 21-29.
- [16] 杨东, 王慧, 程军奇, 等. 近 50 年青海省气候变化特征及其与 ENSO 的关系[J]. 生态环境学报, 2013, 22(4): 547-553.
- [17] Li Y. Southern Ocean SST variability and its relationship with ENSO on inter-decadal time scales [J]. *Journal of Ocean University of China*, 2013, 12(2): 287-294.
- [18] Zhang X L, Xiao Z N, Li Y E. Effects of Indian Ocean SSTA with ENSO on winter rainfall in China[J]. *Journal of Tropical Meteorology*, 2014, 20(1): 45-56.
- [19] Vicente-Serrano S M, Beguería, Santiago, et al. A multi-scalar drought index sensitive to global warming: the standardized precipitation evapotranspiration index[J]. *Journal of Climate*, 2010, 23(7): 1696-1718.
- [20] 李伟光, 侯美亭, 陈汇林, 等. 基于标准化降水蒸散指数的华南干旱趋势研究[J]. 自然灾害学报, 2012, 21(4): 84-90.
- [21] 庄少伟. 基于标准化降水蒸发指数的中国区域干旱化特征分析[D]. 兰州: 兰州大学, 2013.
- [22] 王林, 陈文. 标准化降水蒸散指数在中国干旱监测的适用性分析[J]. 高原气象, 2014, 33(2): 423-431.
- [23] 周丹, 张勃, 任培贵, 等. 基于标准化降水蒸散指数的陕西省近 50 年干旱特征分析[J]. 自然资源学报, 2014, 29(4): 677-688.
- [24] 荣艳淑, 余锦华, 段丽瑶. 20 世纪 80, 90 年代华北干旱特征及成因分析[J]. 高原气象, 2007, 26(2): 319-325.
- [25] 孟万忠, 王尚义, 赵景波. ENSO 事件与山西气候的关系[J]. 中国沙漠, 2013, 33(1): 258-264.
- [26] 李晓燕, 翟盘茂, 任福民. 气候标准值改变对 ENSO 事件划分的影响[J]. 热带气象学报, 2005, 21(1): 72-78.
- [27] 赵守栋, 王京凡, 何新, 等. 城市化对气候变化的影响及其反馈机制研究[J]. 北京师范大学学报, 2014, 50(1): 66-72.
- [28] Kalnay E, Cai M. Impact of urbanization and land-use change on climate[J]. *Nature*, 2003, 423(6939): 528-531.
- [29] 周雅清, 任国玉. 城市化对华北地区极端气温事件频率的影响[J]. 高原气象, 2014, 33(6): 1589-1598.
- [30] 任国玉, 张雷, 卞韬, 等. 城市化对石家庄站日气温变化的影响[J]. 地球物理学报, 2015, 58(2): 398-410.
- [31] Merryfield W J. Changes to ENSO under CO₂ doubling in a multimodel ensemble [J]. *Journal of Climate*, 2006, 19(16): 4009-4027.
- [32] 方长芳. 全球变暖对北太平洋年代际变化的影响及可能机制研究[D]. 山东青岛: 中国海洋大学, 2010.



(上接第 194 页)

- [16] Maduako I N, Ndukwu R I, Ifeanyichukwu C, et al. Multi-index soil moisture estimation from satellite earth observations: comparative evaluation of the topographic wetness index(TWI), the temperature vegetation dryness index (TVDI) and the improved TVDI (iTVDI)[J]. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, 2017, 45(4): 631-642.
- [17] Chen J A, Wang C Z, Jiang H, et al. Estimating soil moisture using Temperature-Vegetation Dryness Index (TVDI) in the Huang-huai-hai (HHH) plain[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2011, 32(4): 1165-1177.
- [18] 陈斌, 张学霞, 华开, 等. 温度植被干旱指数 (TVDI) 在草原干旱监测中的应用研究[J]. 干旱区地理, 2013, 36(5): 930-937.
- [19] 齐述华, 王长耀, 牛铮. 利用温度植被旱情指数 (TVDI) 进行全国旱情监测研究[J]. 遥感学报, 2003, 7(5): 420-427.
- [20] 孙振蓉, 陈斌, 张学霞. 锡林郭勒盟农牧业干旱风险评价[J]. 自然灾害学报, 2014, 23(5): 129-139.
- [21] 那音太. 基于 SPI 指数的近 50 a 内蒙古地区干旱特征分析[J]. 干旱区资源与环境, 2015, 29(5): 161-166.
- [22] 张巧凤, 刘桂香, 于红博, 等. 基于标准化降水指数的锡林郭勒盟干旱特征分析[J]. 自然灾害学报, 2015, 24(5): 119-128.
- [23] 刘志刚, 刘丽萍, 游晓勇, 等. 锡林郭勒草原气候变化与干旱特征[J]. 内蒙古气象, 2008(1): 17-18.
- [24] 辛志远, 史激光, 刘雅琴, 等. 锡林郭勒地区降水时空分布特征及变化趋势[J]. 中国农学通报, 2012, 28(2): 312-316.