

内蒙古地区干旱时空变化特征及其对植被的影响

马梓策¹, 孙鹏^{1,2,3}, 姚蕊⁴, 吕胤锋¹, 邹逸凡¹

(1.安徽师范大学地理与旅游学院,安徽 芜湖 241002;

2.北京师范大学环境演变与自然灾害教育部重点实验室,北京 100875;3.北京师范大学地表过程与资源生态国家重点实验室,北京 100875;4.南京师范大学虚拟地理环境教育部重点实验室,南京 210023)

摘要: 基于 MODIS 实际蒸散量(ET)和潜在蒸散量(PET)产品反演作物缺水指数(CWSI),采用多种统计方法研究干旱时空变化特征及其对植被生长的影响。结果表明:多年平均干旱程度由西南向东北逐渐递减,农作物主要以轻旱和中旱为主,草原主要以中旱和重旱为主,荒漠主要以重旱为主;除针叶林和沼泽外,其他植被类型旱情缓解;干旱年内变化特征呈双峰型曲线,且在 Day113~Day144 干旱最为严重,表现为重旱;各植被类型年内变化特征与全区变化趋势相一致,均呈双峰型曲线;夏旱对植被生长的胁迫作用最强,而年平均干旱强度对植被生长的胁迫作用主要由夏旱主导;春季灌丛、夏季和秋季农作物对干旱的响应较为敏感。研究结果可为内蒙古植物群落的生态预警和生态修复提供理论参考。

关键词: 作物缺水指数; 植被类型; NDVI; 干旱监测; 内蒙古地区

中图分类号:P46

文献标识码:A

文章编号:1009-2242(2022)06-0231-10

DOI:10.13870/j.cnki.stbcxb.2022.06.029

Temporal and Spatial Variation of Drought and Its Impact on Vegetation in Inner Mongolia

MA Zice¹, SUN Peng^{1,2,3}, YAO Rui⁴, LÜ Yinfeng¹, ZOU Yifan¹

(1.School of Geography and Tourism, Anhui Normal University, Wuhu, Anhui 241002; 2.Key Laboratory of

Environmental Change and Natural Disaster, Ministry of Education, Beijing Normal University, Beijing 100875;

3.State Key Laboratory of Surface Process and Resource Ecology, Beijing Normal University, Beijing 100875; 4.Key Laboratory of Virtual Geographic Environment, Ministry of Education, Nanjing Normal University, Nanjing 210023)

Abstract: Inversion of Crop Water Stress Index (CWSI) was conducted based on the evapotranspiration (ET) and potential evapotranspiration (PET) of MODIS. Temporal and spatial variation of drought and its impact on vegetation were analyzed through a variety of statistical methods. The results showed that the annual average drought severity gradually decreased from southwest to northeast, the crops were mainly light and moderate drought, the grassland was mainly medium and heavy drought, and the desert was mainly severe drought. In addition, except coniferous forest and swamp, the drought tendency of other vegetation types was eased. The variation characteristics of annual drought showed a bimodal curve, and the severe drought occurred in 113 to 144 days. The annual variation characteristics of drought severity for each vegetation type were consistent with the change trend of the whole region, showing a bimodal curve. The impact of summer drought on vegetation growth was the strongest, and the stress effect of annual average drought intensity on vegetation growth was mainly dominated by summer drought. For different vegetation types, shrub in spring, crops in summer and autumn were more sensitive to drought. The results could provide theoretical reference for ecological early warning and ecological restoration of plant communities in Inner Mongolia.

Keywords: crop water stress index; vegetation types; NDVI (normalized difference vegetation index); drought monitoring; Inner Mongolia

收稿日期:2022-03-19

资助项目:国家自然科学基金项目(42271037);安徽省自然科学基金优秀项目(2108085Y13);安徽省重点研究与开发计划项目(2022m07020011);安徽高校协同创新项目(GXXT-2021-048);安徽省科技重大专项(202003a06020002);安徽省高校自然科学研究项目(YJS20210131)

第一作者:马梓策(1995—),男,在读博士研究生,主要从事资源环境与区域规划研究。E-mail:Ma95zice@163.com

通信作者:孙鹏(1986—),男,博士生导师,主要从事气象水文学和遥感水文学研究。E-mail:sun68peng@163.com

干旱是频繁发生且持续时间较长的重复性自然灾害,对经济发展和生态环境建设,尤其是对农业生产具有重要的影响^[1-2]。干旱通常分为 4 类:气象干旱、农业干旱、水文干旱和社会经济干旱^[3]。其中,农业干旱的实质是因降水不足,气温较高,土壤含水量过低,进而导致植被生产力下降,因此土壤含水量的反演成为农业遥感干旱监测研究的热点话题。

随着遥感技术的发展,国内外学者利用卫星遥感地面观测数据监测各种地表的动态变化并取得一系列成果^[4-7]。遥感技术的优势在于数据易获取、覆盖范围广和具有时空连续性,弥补了站点观测数据的不足,在干旱监测中得到广泛应用,常用的包括温度植被干旱指数(temperature vegetation drought index, TVDI)^[8-10]、植被状况指数(vegetation condition index, VCI)^[11]、温度状态指数(temperature condition index, TCI)^[12]、作物缺水指数(crop water stress index, CWSI)^[13]、垂直干旱指数(perpendicular drought index, PDI)^[14-15]等。其中 CWSI 是基于地表能量平衡原理,具有较高的测量精度和明确的物理定义,这是优于其他干旱指数的一个重要因素^[16]。此外,该指数还考虑了地面风速、水汽压、日照时间和气温等因素对干旱的影响^[17]。但该指标的计算较为复杂,需要常规气象数据和地面观测资料共同参与,因此使 CWSI 的应用受到限制^[18]。2011 年,美国国家航空航天局(national aeronautics and space administration, NASA)研究小组根据 Penman-Monteith 公式对 MOD16 数据进行了修正,并以高时空分辨率和自由访问方式发布了全球 MOD16 数据^[18-20],为 CWSI 的计算提供了新的思路。目前,许多学者对 MOD16 产品进行了验证,表明该数据应用范围广泛且具有较高的可靠性。此外,它在用水效率、干湿模式监测、实际蒸散量估算和缺水足迹等领域得到广泛应用并取得显著进展^[21-23]。因此,MOD16 数据在干旱监测中具有更广泛的应用价值。

植物群落是易受干旱影响的生态系统,干旱引起生态环境恶化,植被覆盖度下降,均导致植被生产力下降。内蒙古地区是中国主要的农牧产品绿色生产基地之一,频繁发生的干旱事件对该地区的农业和畜牧业生产构成巨大威胁。目前,已有研究^[17,24-25]表明,CWSI 更加适合于监测北方干旱,但针对 8 天尺度及不同植被类型的研究较少。因此,本研究利用 CWSI 分析了 2001—2017 年内蒙古地区及各植被类型的干旱时空变化情况,并探讨了 CWSI 与归一化植被指数(normalized differential vegetation index, NDVI)的相关性,揭示干旱对内蒙古地区植被盖度

的胁迫作用。本研究旨在评价 CWSI 在内蒙古地区干旱监测有效性的同时,以为内蒙古植物群落的生态预警和生态修复提供理论参考。

1 数据来源与研究方法

1.1 研究区概况

内蒙古地区位于中国北部边疆(37°24′—53°23′N, 97°12′—126°04′E),横跨东北、华北和西北地区,接壤 8 个省区,外与蒙古国和俄罗斯接壤,总面积约为 118.3 万 km²,是中国面积第三大的省级行政区(图 1)。研究区以温带大陆性季风气候为主,从东至西由湿润、半湿润区逐渐过渡到半干旱、干旱区,气温和降水在时空分布上不均匀,年均气温约为 -4.65~9.14 °C,年降水量约为 35.86~506.15 mm,年平均蒸发量 942~4 138 mm。该区生态环境极其脆弱,草地退化,水土流失严重,水资源分布不平衡,干旱是该区域最严重的自然灾害,对农业生产发展的影响尤为严重^[26]。

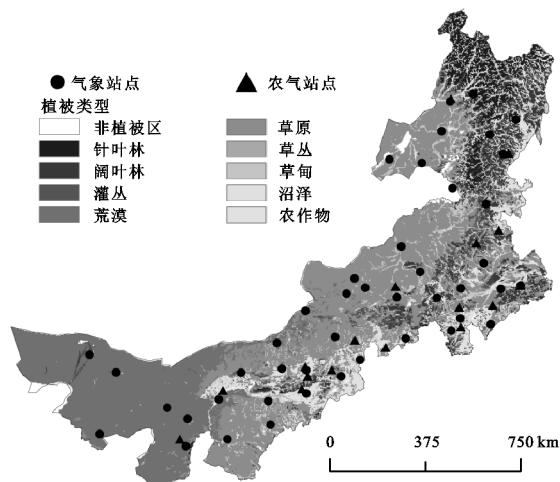


图 1 研究区植被类型以及气象站和农气站点空间分布

1.2 数据来源与预处理

2003—2009 年和 2011—2012 年 4—9 月(解冻后和封冻前)逐旬的 20 cm 土壤相对湿度数据(RSM),根据研究区气候状况,剔除异常值,将旬数据平均合成月 RSM;2001—2017 年内蒙古 45 个气象站点逐月的气温和降水数据集,均来源于国家气象信息中心(<http://data.cma.cn/>),站点位置见图 1。研究区年降水与年平均气温的时间序列,从其线性回归趋势可以看出,研究区年降水呈明显的上升趋势,年平均气温则呈微弱的下降趋势(图 2)。2001—2017 年 MOD16A2 和 MOD13A3,均来源于美国国家航空航天局(NASA)(<https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov/>)。其中,MOD16A2 为 8 天合成实际蒸散量(ET)和潜在蒸散量(PET),分辨率为 0.5 km;MOD13A3 为月合成归一化植被指数(NDVI),分辨率为 1 km。借助于 NASA 提供的 MRT 软件将

HDF 格式转换为 Geo-Tiff 格式,将 SIN 投影转为 WGS~1984/Geographic 经纬坐标系,并进行镶嵌和裁剪。根据网站提供的数据使用说明,剔除数据中的无效值并还原真实值,获得研究区 ET 、 PET 和 $NDVI$ 数据集,并将其统一至 1 km 分辨率。植被类型数据由中国科学院资源环境科学与数据中心提供的中国 1 km 分辨率的植被类型数据(<http://www.resdc.cn>),将其进行裁剪和重分类为针叶林、阔叶林、灌丛、荒漠、草原、草丛、草甸、沼泽和农作物植被等 9 个植被类型(图 1)。

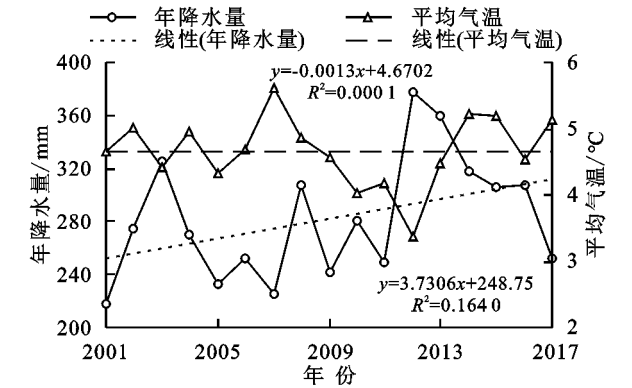


图 2 内蒙古地区年降水量与年平均气温的时间变化趋势

1.3 研究方法

1.3.1 作物缺水指数(CWSI) 作物缺水指数(CWSI),又叫蒸散发亏缺指数,是根据地表能量平衡原理,测量精度高,物理意义明确,这是优于 TVDI 的一个主要原因。此外 CWSI 并不要求研究区域具备所有土地利用类型,并且充分考虑下垫面的植被覆盖状况和地面风速、水汽压、日照时间、温度等气象要素^[13]。Jackson 等^[27-28]对 CWSI 进行了相关研究,并将 CWSI 定义为:

CWSI=1-ET/PET (1)

式中: ET 为实际蒸散量; PET 为潜在蒸散量,CWSI 在 0~1,值越大表示区域越干旱缺水,反之越湿润。

1.3.2 线性倾向估计 利用线性倾向估计计算每个像元 2001—2017 年 ET 、 PET 和 CWSI 时间线性倾向率。当斜率大于 0 时,表示随着时间(t)的增加, ET 、 PET 和 CWSI 呈现上升趋势;反之,呈下降趋势。

1.3.3 Hurst 指数 通过计算 Hurst 指数^[29]分析内蒙古地区 CWSI 的未来变化趋势及各植被类型干旱的未来演变趋势。基于重标极差(R/S)分析方法的 Hurst 指数,是一种基于长程相关思想的时间序列分析方法,用于定量描述时间序列信息长期依赖性。

Hurst 指数取值范围为 $H(0<H<1)$, H 取值可分为 3 种情况:当 $H=0.5$ 时,表明序列是随机序列;当 $H>0.5$ 时,表明未来的变化情况与过去一致,即持续性, H 越大,持续性越强;当 $0<H<0.5$ 时,表

明未来的变化情况与过去相反,即反持续性, H 越小,反持续性越强。

2 结果与分析

2.1 CWSI 干旱监测结果检验

为了确保 CWSI 干旱监测结果的准确性,对基于 MOD16A2 产品反演的 CWSI 进行检验,中国气象局以 20 cm 处 RSM 作为干旱的分级标准^[30]。因此,本文选择 20 cm 处的 RSM 与 CWSI 进行相关性分析,从两者的拟合系数(R^2)来判断其干旱监测的有效性。图 3 为 2003—2009 年和 2011—2012 年 4—9 月 16 个农业气象站点的月 CWSI 与 20 cm 处 RSM 之间的相关关系。结果表明,CWSI 与 20 cm 处 RSM 之间具有较高的相关性,拟合系数高达 0.86,说明利用 MOD16A2 产品反演的 CWSI 能够较好地反映 RSM 的变化情况,作为干旱严重程度的评价指标具有一定合理性。

为了定量比较 CWSI 和 20 cm 处 RSM 表达的干旱严重程度,参考中国气象局和相关文献^[25,30],建立 RSM 与 CWSI 的回归方程式 $y = -0.0063x + 1.1505$ (图 3)。式中: y 为 CWSI 的值; x 为 RSM 的值。以 RSM 作为旱情的分级标准,分别把 $x=30$ 、 $x=40$ 、 $x=50$ 和 $x=60$ 代入到回归方程中,得到 CWSI 的干旱等级划分标准(表 1)。

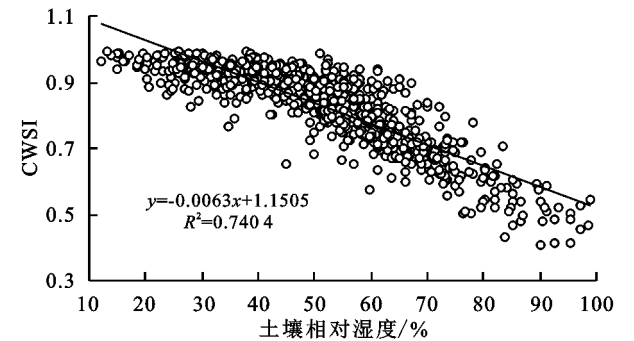


图 3 CWSI 与土壤相对湿度之间的相关性

表 1 干旱等级划分标准		
土壤相对湿度(RSM)/%	CWSI	干旱等级
RSM>60	0~0.7725	无干旱
50<RSM≤60	0.7725~0.8355	轻度干旱
40<RSM≤50	0.8355~0.8985	中等干旱
30<RSM≤40	0.8985~0.9615	严重干旱
RSM≤30	0.9615~1	特大干旱

2.2 干旱的时空变化特征

2.2.1 干旱空间变化特征 2001—2017 年内蒙古地区多年平均 ET 、 PET 、CWSI 的分布存在明显的空间异质性(图 4), ET 呈现出西南低、东北高的空间格局,而 PET 和 CWSI 呈现出西南高、东北低的空间格局,CWSI 与 ET 的空间格局具有相反的变化趋势,

而与 PET 的空间格局相一致。多年平均 ET 波动范围为 39.00~677.20 mm, PET 波动范围为 375.06~1873.72 mm, $CWSI$ 波动范围为 0.33~0.99。具体来说,严重干旱和特大干旱占总面积的 20.80%,主要位于内蒙古中部锡林郭勒草原南端的浑善达克沙地、河套平原和阴山山脉; ET 值较高、 PET 值较低为特征的无旱占总面积的 36.32%,主要位于内蒙古东部的大兴安岭山脉一带和森林草原交错区。

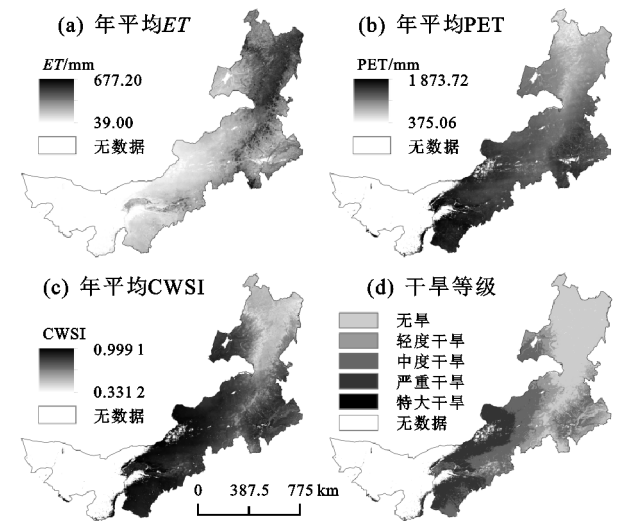


图 4 2001—2017 年内蒙古年平均 ET 、 PET 和 $CWSI$ 的空间分布

$CWSI$ 与 ET 具有相反的变化趋势,与 PET 具有相同的变化趋势,可以通过蒸散量互补相关理论分析和 $CWSI$ 的定义进行解释^[31]。当下垫面充分湿润时, ET 与 PET 相等, $CWSI=0$;当水分不充分时, ET 减少,陆面和大气相互作用导致 PET 增加, $CWSI$ 增加;当无水分供给时,基本无蒸散,地表植物干枯或死亡, $CWSI=1$ 。内蒙古东部的大兴安岭一带和森林草原交错区的植被茂密,降水量充沛,年均气温偏低致使该区域 ET 值偏高, PET 值偏低,因此不易发生干旱;中部锡林郭勒草原南端的浑善达克沙地、河套平原和阴山山脉等区域太阳辐射较高,日照时间长,降水量稀少,气温偏高,下垫面供水不足,导致 ET 值偏低, PET 值偏高,因此干旱程度较大。

根据图 5 各植被类型的不同干旱等级所占面积比例可知,位于大兴安岭山脉的针叶林、阔叶林和沼泽植被,因常年降水量充沛,气温偏低,主要表现为无旱,所占面积比分别为 97.19%,75.06%和 99.40%;森林草原交错区的灌木丛和草丛,因生态环境脆弱,有 1/2 以上的区域受干旱的影响,分别占总面积的 55.73%和 75.93%,主要表现为无旱和轻度干旱;阴山山脉和浑善达克沙地的荒漠植被区,因常年降水稀少、气温偏高,主要表现为严重干旱(93.41%);锡林郭勒盟的草甸草原和呼伦贝尔沙地的典型草原植被

表现为中度干旱,约占总面积的 32.90%,阴山山脉、锡林郭勒盟、鄂尔多斯市的半荒漠草原和荒漠草原植被表现为严重干旱,约占总面积的 31.42%;草甸分布较为疏散主要表现无旱(51.59%);农作物虽然有灌溉用水的补给,但是部分地区由于灌溉条件的限制,仍有农作物受到干旱的影响,主要表现为轻度干旱(30.52%)和中度干旱(37.69%)。通过对比各植被类型的不同干旱等级所占面积比例可知,内蒙古林区受干旱的影响最小,其次是农区,而牧区受干旱的影响最为严重。

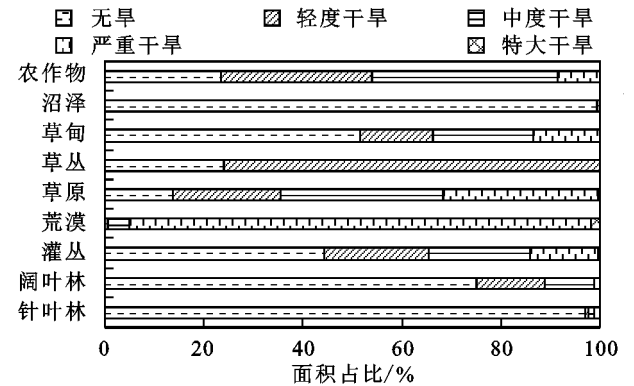
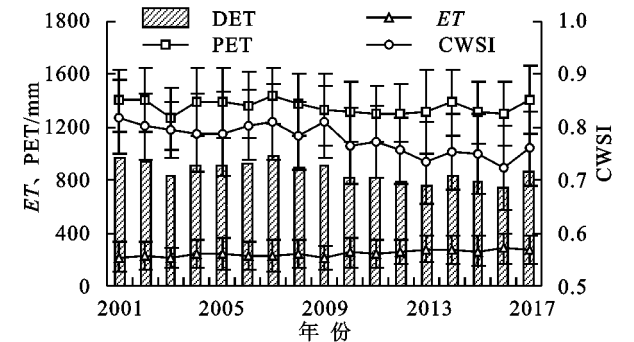


图 5 各植被类型不同干旱等级所占面积比

2.2.2 干旱年际变化特征 根据内蒙古地区 ET 、 PET 、差值(DET ,即 PET 减去 ET)和 $CWSI$ 的年际变化(图 6)可知, ET 波动范围为 211.34~282.45 mm,多年平均 ET 为 245.62 mm, PET 波动范围为 1 024.32~1 209.94 mm,多年平均 PET 为 1 109.77 mm, PET 与 ET 的差值的波动范围为 741.87~980.94 mm,多年平均 DET 为 864.15 mm, ET 呈显著增加趋势($p<0.05$), PET 呈显著减少趋势($p<0.05$), DET 呈显著减少趋势($p<0.05$), $CWSI$ 呈显著下降趋势($p<0.05$),表明内蒙古地区干旱化趋势有所减缓,多年平均 $CWSI$ 为 0.778 7,最大值出现在 2001 年(0.818 9),最小值在 2016 年(0.724 3),整体上内蒙古地区处于轻度干旱状态。



注:误差线为研究区全部像元的标准差。

图 6 2001—2017 年内蒙古年平均 ET 、 PET 、 $CWSI$ 的变化

2001—2017 年内蒙古各植被类型干旱状况的年际变化特征见图 7。从年均 $CWSI$ 的年际变化情况来看,各植被类型的年均 $CWSI$ 从大到小依次为荒

漠>草原>农作物>灌木丛>草丛>草甸>阔叶林>针叶林>沼泽。其中,荒漠植被的 CWSI 波动在 0.82~0.94,多数年份表现为严重干旱,仅在 2014 年表现为轻度干旱,2016 年和 2017 年表现为中度干旱;草原植被的 CWSI 波动在 0.77~0.87,在 2010 年以前在轻度干旱(2003 年、2008 年)和中度干旱波动变化,而 2010 年以后除 2013 年(无旱),其余均表现为轻度干旱;农作物植被的 CWSI 波动在 0.73~0.85,在 2012 年以后均表现为无旱,2012 年以前多数年份表现为轻度干旱,仅有 2001 年表现为中度干旱;灌木丛和草丛的 CWSI 波动在 0.69~0.84,无旱和轻度干旱出现的频率相当;草甸、阔叶林、针叶林和沼泽,均处于无旱状态。

为进一步说明各植被类型 CWSI 随时间变化的趋势和显著性,从表 2 可知,除荒漠植被年 CWSI 呈显著下降趋势外,其余各植被类型的年 CWSI 均呈极显著下降趋势,且针叶林、阔叶林和沼泽的年 CWSI 下降最为显著。由此可见,沼泽、针叶林和阔叶林的 CWSI 较小,且干旱减缓程度较高,表明沼泽、针叶林和阔叶林的抗干旱能力最强这对区域水源涵养具有重要意义。

表 2 不同植被类型 CWSI 的干旱变化趋势

植被类型	回归方程	R^2	显著性	CWSI 趋势	干旱趋势	Hurst 指数	未来变化趋势
针叶林	$y=-0.0054x+0.5882$	0.4357	$p<0.01$	-0.054/10 a	变湿	0.4992	变干
阔叶林	$y=-0.0063x+0.6819$	0.6062	$p<0.01$	-0.063/10 a	变湿	0.5204	变湿
灌木丛	$y=-0.0055x+0.8130$	0.5858	$p<0.01$	-0.055/10 a	变湿	0.6207	变湿
荒漠	$y=-0.0031x+0.9336$	0.3514	$p<0.05$	-0.031/10 a	变湿	0.5590	变湿
草原	$y=-0.0048x+0.8673$	0.6406	$p<0.01$	-0.048/10 a	变湿	0.5935	变湿
草丛	$y=-0.0058x+0.8086$	0.5058	$p<0.01$	-0.058/10 a	变湿	0.6354	变湿
草甸	$y=-0.0059x+0.7700$	0.6578	$p<0.01$	-0.059/10 a	变湿	0.5585	变湿
沼泽	$y=-0.0061x+0.5930$	0.4689	$p<0.01$	-0.061/10 a	变湿	0.4930	变干
农作物	$y=-0.0054x+0.8399$	0.6514	$p<0.01$	-0.054/10 a	变湿	0.5804	变湿

2.2.3 干旱的年内变化特征 图 8 为 2001—2017 年内蒙古 8 天多年平均 ET、PET、CWSI 的变化。由图 8 可知,内蒙古地区 ET 年内变化为单峰型曲线,最大值出现在 Day217(夏季)(14.77 mm);PET 年内变化基本也呈单峰型变化趋势,但在 Day145~Day217(暮春、夏季)期间 PET 有轻微波动,最大值出现在 Day145(暮春)(49.75 mm);DET 年内变化基本也呈单峰型变化趋势,最大值出现在 Day145 天(暮春)(43.94 mm)。内蒙古地区 CWSI 年内变化为双峰型曲线,8 天平均 CWSI 约 0.674 9,峰值位于 Day121(暮春)(0.904 3)和 Day265(初秋)(0.836 8),分别表现为严重干旱和中等干旱,谷值位于 Day217(末伏)(0.688 7),表现为无旱。具体为 CWSI 在 Day1~Day72(冬季、初春)、Day169~Day248(夏季、初秋)和 Day289~Day365(366)(深秋、冬季),均表现为无旱,

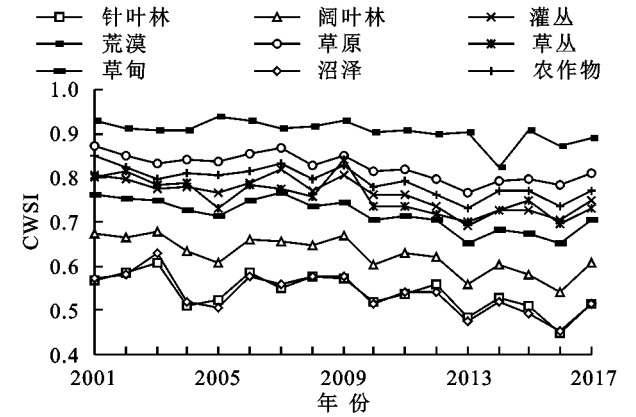


图 7 2001—2017 年内蒙古各植被类型 CWSI 年际变化

此外,从 Hurst 指数来看,各植被类型的变化趋势均表现出一定程度的持续性。其中,针叶林和沼泽年 CWSI 的 Hurst 指数值为 0.50 和 0.49,表现为较弱的反持续性,预示针叶林和沼泽的 CWSI 变化趋势与过去相反,干旱有较弱的加重趋势;其余各植被类型年 CWSI 的 Hurst 指数值均大于 0.5,表明这些植被类型的年 CWSI 变化趋势具有一定程度的持续性,即干旱仍然呈减缓趋势;其中,灌木丛和草丛的持续性最强,年 CWSI 的 Hurst 指数值均大于 0.6,表明灌木丛和草丛未来干旱减缓趋势最为明显。

主要可能是 Day1~Day72 和 Day289~Day365(366),该期间气温偏低,PET 较小;而 Day169~Day248,该期间气温偏高,蒸散作用较强,但是降水量充沛,能及时对地面水分进行补给。CWSI 在 Day73~Day168 和 Day249~Day288,均有不同程度的干旱,且在 Day113~Day144 天,表现为严重干旱,主要是因为在此期间,处于春季积雪消融期,气温回升,适当的温度和水分用于牧草返青,没有足够的温度和水分用于蒸散;而 Day249~Day288,处于秋季植被枯黄期,气温开始下降,植被蒸腾作用减弱,因此在该期间内,内蒙古地区总体表现为干旱。

为分析各植被类型的年内干旱变化特征,根据 8 天间隔统计不同植被类型 17 年来 CWSI 的均值(图 9)。从图 9 来看,各植被类型年内 CWSI 均值总体变化趋势与全区变化趋势相一致,均呈双峰型曲线。除

农作物植被和荒漠植被外,春季随着气温逐渐升高和植被生长,CWSI 逐渐增大,Day113~Day121(暮春)达到峰值,这对自然植被的返青非常不利;随着雨季来临,CWSI 逐渐下降(Day121~Day217);随着枯黄期的来临,植被蒸腾减弱,CWSI 逐渐上升(Day217~Day273);进入晚秋和初冬,植被停止生长,需水量减少,CWSI 又缓慢降低。对于荒漠植被而言,由于生长在降水量稀少,温度偏高的地区,随着春季气温的增加到秋季气温逐渐下降,一直处于严重干旱和特大干旱状态(Day81~Day273)。对于农作物植被而言,春季是农作物植被最需要水分供给的时期,土壤的水分被农作物吸收后,虽然有人工灌溉用水的补给,但是随着气温的升高,水分蒸发较为严重,在 Day105~Day153 干旱最为严重,表现为严重干旱。

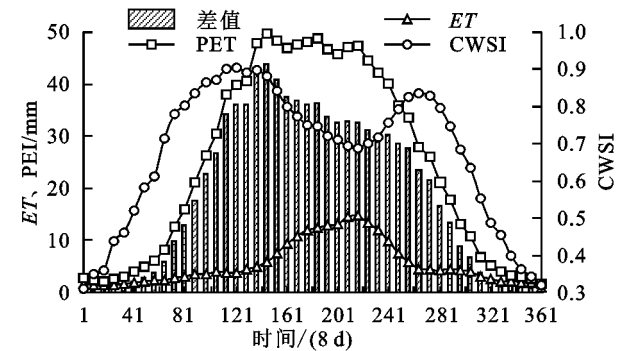


图 8 2001—2017 年内蒙古 8 天尺度 ET、PET、CWSI 的变化情况

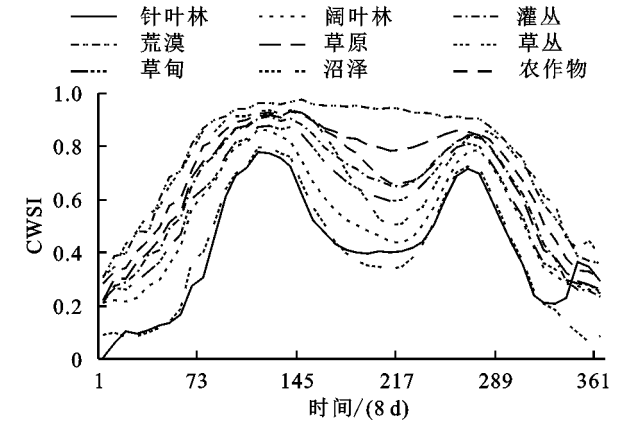


图 9 2001—2017 年内蒙古各植被类型的月尺度 CWSI 变化情况

2.2.4 干旱的时空演变趋势 年均 CWSI 反映的是研究区总体的干旱情况,但因为研究区地形复杂,植被类型差异较大,年均 CWSI 所能反映的干旱状况的时空演变趋势有限。为了更好地解决这一问题的局限性,本文利用线性倾向估计来计算每个像元 2001—2017 年 ET、PET 和 CWSI 时间线性倾向率,其空间分布见图 10。从图 10 可以看出,2001—2017 年 ET 空间变化率介于-31.39~37.92 mm/a,平均变化率为 3.75 mm/a;其中,仅有 0.78%呈负显著变化趋势,而呈正显著变化趋势的面积高达 50.01%,主要集中分布在森林草原交错区和农田密集的区域(图

10)。此外,中西部的荒漠草原区和呼伦贝尔的森林区均未通过显著性检验,说明其变化趋势不明显。PET 空间变化率介于-104.08~86.11 mm/a,平均变化率为-3.95 mm/a;其中,仅有 0.53%呈正显著变化趋势,而有 29.30%呈负显著变化趋势,主要集中分布在锡林郭勒盟东北部的草甸草原区,而其他大部分地区未通过显著性检验,变化趋势不明显。CWSI 空间变化率介于-0.029 6~0.019 5/a,平均变化率为-0.004 7/a;其中,仅有 0.06%呈正显著变化趋势,而有 75.62%呈负显著变化趋势,主要集中分布在内蒙古地区南部的农业区、锡林郭勒盟的草原区和呼伦贝尔南部的林区,而内蒙古中西部的荒漠草原区、阴山山脉、呼伦贝尔北部的干旱变化趋势不明显。

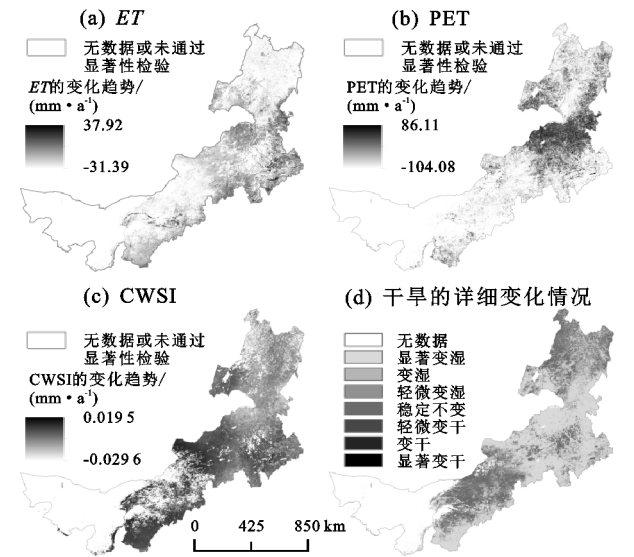


图 10 2001—2017 年内蒙古年际 ET、PET、CWSI 及干旱的变化趋势

通过相关系数绝对值来判断其显著性程度(表 3),结合线性倾向估计结果(图 10c),将干旱详细变化情况划分为明显变湿、变湿、轻微变湿、稳定不变、轻微变干、变干和明显变干 7 种类型,据此对 CWSI 变化情况进行重分类,得到干旱详细变化情况的空间格局(图 10d)。对各植被类型干旱详细变化情况进行统计,结果见图 11。从图 10d 和图 11 可以看出,内蒙古明显变湿的区域所占面积最大,说明 2000—2017 年研究区有湿润化的趋势。对不同植被类型来说,阔叶林旱情缓解最为明显,具有明显变湿的面积为 75.06%;其次,灌木丛明显变湿的面积为 44.27%;而针叶林主要以保持稳定不变为主,占其面积的 44.21%,主要是因为近年来内蒙古地区降水量增加,针叶林生长在降水量较为充沛的地区,而阔叶林和灌木丛生长在降水量相对匮乏的区域,降水量的显著增加对阔叶林和灌木丛的干旱具有较好的缓解作用。草原植被以轻微变湿(32.90%)和保持稳定(31.42%)为主;草丛植被以变湿(75.93%)为主;而

草甸植被以明显变湿(51.59%)为主,主要因为草原植被包括荒漠草原,其植被覆盖度较低,生态环境较为脆弱,生态恢复困难。荒漠植被主要以保持稳定(93.41%)为主,其明显变干(1.67%)的荒漠植被区仅低于轻微变湿(4.46%)的区域,并且是 9 种植被类型中唯一明显变干的区域超过 1% 的植被类型,表明荒漠植被区的生态恢复紧迫。沼泽植被由于近年来对湿地保护力度的加大,其干旱减缓趋势也最为明显,明显变湿的面积为 99.40%。农作物植被在灌溉技术提高的情况下,其干旱也得到一定的减缓,以变湿(37.69%)和轻微变湿(30.52%)为主。因此,近 17 年来,虽然采取一系列的生态保护工程(三北防护林建设、退耕还草、退牧还草工程等),但荒漠草原和荒漠植被区的生态恢复依然较不理想,直接影响生物量和植被覆盖度,导致区域生产力的降低。

表 3 干旱趋势变化显著性等级划分

Slope	相关系数绝对值			
	$ R \leq 0.482$	$0.482 < R \leq 0.558$	$0.558 < R \leq 0.606$	$ R > 0.606$
$Slope \leq 0$	稳定不变	轻微变湿	变湿	显著变湿
$Slope > 0$	稳定不变	轻微变干	变干	显著变干

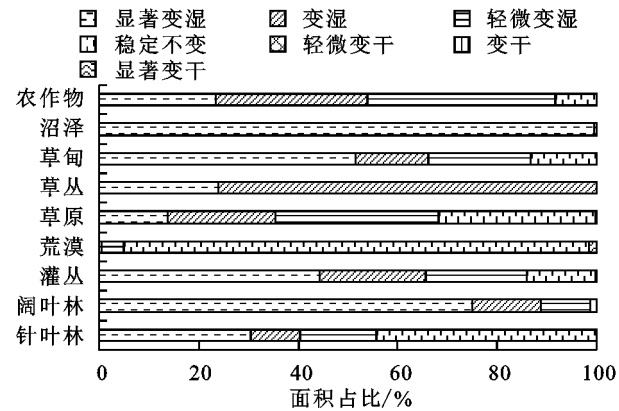


图 11 不同植被类型中不同干旱变化类型所占面积比

为了进一步分析干旱的时空演变趋势,本文采用 Hurst 指数来计算每个像元 2001—2017 年 CWSI 的 Hurst 指数值,再将 CWSI 线性倾向率与 Hurst 指数结果进行耦合分析,得到干旱的未来变化趋势空间分布图,结果见图 12。内蒙古地区 CWSI 的 Hurst 指数平均值为 0.57,表明未来短期内 CWSI 的变化趋势与过去一致;其中,干旱具有正向持续性像元面积占 70.33%,反向持续性像元面积占 29.67%(图 12b)。然后对各植被类型干旱未来变化趋势进行统计,结果见图 13。从图 13 可以看出,内蒙古九大植被区除针叶林区 and 沼泽植被区外,均以持续性变湿润为主,尤以草丛、草原、灌丛和荒漠最为明显,均占各植被区面积的 70% 以上,表明这些植被类型未来短期内干旱有持续性好转的趋势;而针叶林和沼泽植被来说,由湿润转为干旱为主,表明这 2 种植被类型未来短期内

干旱有恶化的可能性,需加大对针叶林和沼泽植被的保护力度。

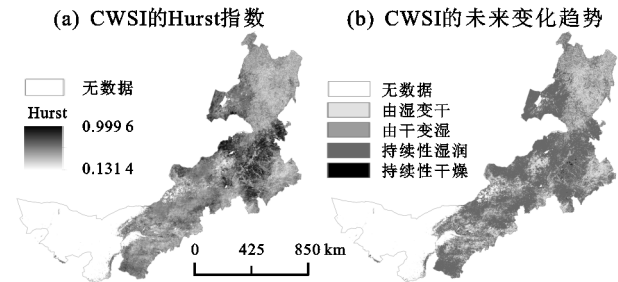


图 12 基于 Hurst 指数的内蒙古地区干旱未来变化趋势

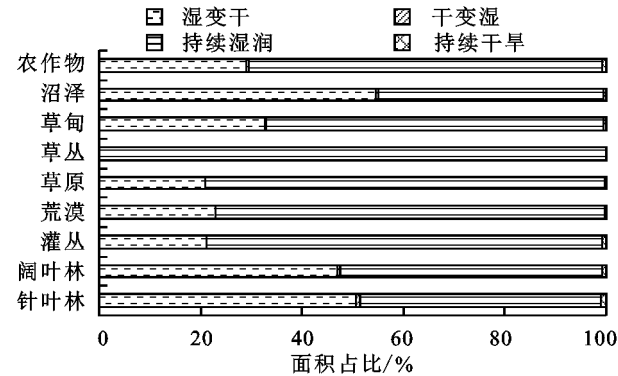


图 13 不同植被类型中各干旱未来变化趋势类型所占面积比

2.3 干旱对植被生长的胁迫作用

不同时相的干旱对植被生长的不同阶段产生较大的影响,为了更深入了解干旱对植被生长的胁迫作用,本文分析了内蒙古地区的植被生长季(春季、夏季和秋季)及全年 CWSI 与 NDVI 的相关系数,结果见图 14。

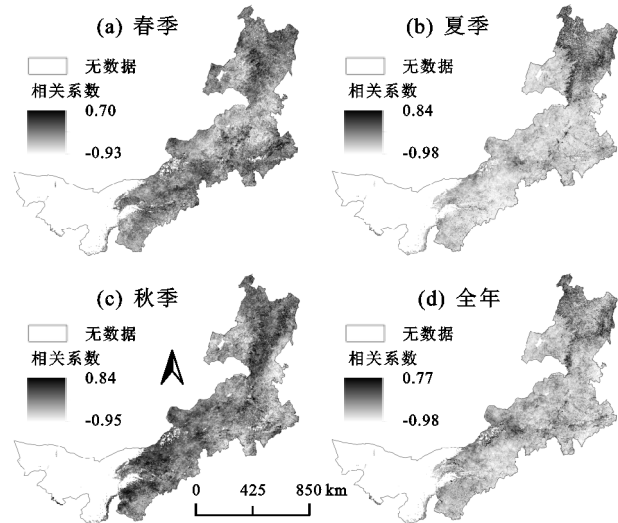


图 14 不同季节及年 CWSI 和 NDVI 的相关系数空间分布

各时相的 CWSI 与 NDVI 整体上均呈负相关关系,表明干旱越严重对植被生长的胁迫作用越强。对于不同季节而言,春季 CWSI 与 NDVI 的平均相关系数(r)为 -0.28 ,呈负相关的面积占 87.26%,其中通过显著性检验的面积有 21.63%,集中分布在内蒙古锡林郭勒盟的草甸草原区和典型草原区,以及森林和草原的过渡地带;而有 12.74% 的面积呈正相关,但

通过显著性的面积仅有 0.13%。夏季 CWSI 与 NDVI 的平均相关系数为-0.60,呈负相关的面积占 96.25%,除呼伦贝尔的森林区外,其余大部分地区均通过显著性检验,占总面积的 75.70%;而仅有 3.75%的面积呈正相关,主要集中分布在呼伦贝尔的森林区,这主要因为该区域属于半湿润大陆性季风气候,短时间内的气温升高,致使 CWSI 增加,植被蒸腾量和潜在蒸发量均增加,但由于降水较为充沛,可能引起潜在蒸散发小于降雨量,有利于植被的生长^[32-33]。秋季 CWSI 与 NDVI 的平均相关系数为-0.19,呈负相关的面积占 74.74%,其中呈现显著负相关的面积有 15.28%,集中分布在内蒙古南部的农区,主要是因为秋季是晚秋作物和夏播农作物生长的后期和结实成熟期,也是冬季农作物的播种期,所以秋旱的加重在一定程度上造成农作物减产。对于全年而言,年 CWSI 与 NDVI 的平均相关系数为-0.52,呈负相关的面积占 95.83%,与夏季相似,除呼伦贝尔的森林区外,其余大部分地区呈现显著负相关,占总面积的 64.73%;而仅有 4.17%的面积呈正相关。由此可见,夏旱对植被生长的胁迫作用最强,而全年干旱对植被生长的胁迫作用主要由夏旱主导。

对各植被类型生长季和全年的 CWSI 与 NDVI 平均相关系数进行统计分析。由图 15 可知,各植被类型的季 CWSI 与 NDVI 的相关系数均为夏季 CWSI 对 NDVI 的影响最大,其次是春季,而秋季 CWSI 对 NDVI 的影响最小,这也进一步说明夏旱对植被生长的胁迫作用最强。对于不同植被类型而言,春季和秋季对各植被的生长影响均较小,且未通过显著性检验;春旱对灌丛的植被生长影响最大,对草原的植被生长影响较大,针叶林的植被生长影响最小;秋旱对农作物的植被生长影响最大,而对灌木的植被生长影响较大,对荒漠的植被生长影响最小;而夏季对农作物的植被生长影响最大,对灌木的植被生长影响较大,对荒漠植被生长的影响最小,但均通过显著性检验,表明不同季节各植被类型对干旱的响应敏感程度存在一定差异,春季灌丛对干旱的响应较为敏感,夏季和秋季农作物对干旱的响应较为敏感。从年尺度来说,草丛、草原、灌丛、草甸、农作物对干旱的响应较为敏感,其年 CWSI 与 NDVI 的平均相关系数均通过显著性检验。

3 讨论

内蒙古已有的干旱变化研究主要是针对长期气象观测资料,基于标准化降水蒸散指数(standardized precipitation evapotranspiration index, SPEI)的内

蒙古地区干旱监测的研究结果表明,内蒙古地区西部干旱缓解,东部干旱加剧^[34];而基于标准化降水指数(standard precipitation index, SPI)的研究发现,年际尺度呈现干旱波动性增强、强度加剧、影响范围扩大并向东移动的趋势^[35]。以往的研究结果与本研究结果存在差异,主要是因为以往的研究针对长时间序列的气象干旱监测,与本文基于遥感产品的研究时段不匹配,因此干旱指标反映长期趋势的变化规律不同;另一方面,SPI 和 SPEI 是气象干旱指数,因人类活动如农业灌溉等影响导致气象干旱不能完全表征实际干旱程度。在干旱阶段的灌溉活动显著改变实际蒸散量,MODIS 反演的 CWSI 因考虑实际蒸散发进而能够有效监测灌溉活动的作物实际干旱情况。此外,利用 LAI 计算的 MOD16 可以较为准确地模拟蒸散的时空变化趋势,而 CoLM 和 GLEAM 蒸散产品没有考虑灌溉过程,模拟的蒸发普遍偏低^[36]。

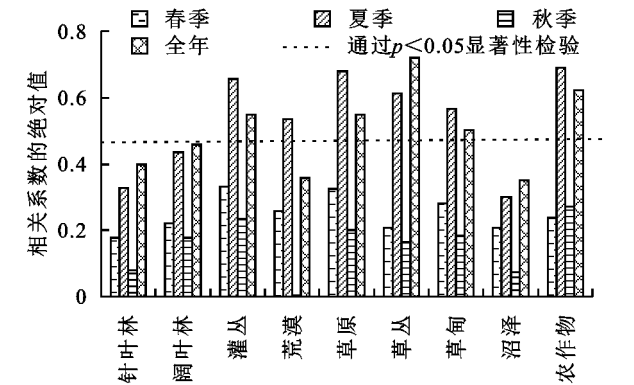


图 15 各植被类型不同季节及年 CWSI 和 NDVI 之间的相关性

在干旱对植被生长的胁迫作用分析中,夏旱对植被生长的胁迫作用最强,而全年干旱对植被生长的胁迫作用主要由夏旱主导,这与黄文琳等^[37]基于标准化降水蒸散指数(standardized precipitation evapotranspiration index, SPEI)和 NDVI 探讨内蒙古地区植被生长对 6—9 月的干旱响应较强的结果相一致。但评价植被生长状况的指标不仅有 NDVI,还有叶面积指数(leaf area index, LAI)、净初级生产力(net primary productivity, NPP)和差值环境植被指数(difference environmental vegetation index, DEVI)等。因此,未来研究应着手于探讨干旱对不同植被生长状况指标的影响,以期更完善地为内蒙古植物群落生态预警和生态修复提供依据。

4 结论

(1)内蒙古地区多年平均干旱程度由西南向东北逐渐降低,不同植被类型干旱存在较大差异,所以若对干旱加以治理,需对不同的植被区采取不同的治理措施。17 年来干旱化趋势有所减缓,且各植被类型均在缓慢变

湿,但针叶林和沼泽在未来短期内有变干的趋势,未来短期内应加强对针叶林和沼泽区的干旱治理。

(2)内蒙古年内干旱呈双峰型曲线,且在 Day113~Day144 干旱最为严重,表现为重旱。各植被类型年内变化特征与全区变化趋势相一致,均呈双峰型曲线。17年来干旱整体变化较大,大部分区域明显变湿。而对于不同植被类型而言,虽然采取一系列的生态保护工程(三北防护林建设、退耕还草、退牧还草工程等),但荒漠草原和荒漠植被区的生态恢复依然较不理想,直接影响生物量和植被覆盖度,导致区域生产力降低。

(3)各时相的 CWSI 与 NDVI 整体上均呈负相关关系,表明干旱越严重,对植被生长的胁迫作用越强。对于不同季节而言,夏旱对植被生长的胁迫作用最强,春旱对植被生长的胁迫作用较强,而秋旱对植被生长的胁迫作用最弱。对于不同植被类型,春季灌丛对干旱的响应较为敏感,夏季和秋季农作物对干旱的响应较为敏感。从年尺度来说,草丛、草原、灌丛、草甸、农作物对干旱的响应较为敏感。

参考文献:

[1] Gao X R, Zhao Q, Zhao X N, et al. Temporal and spatial evolution of the standardized precipitation evapotranspiration index (SPEI) in the Loess Plateau under climate change from 2001 to 2050[J]. *Science of the Total Environment*, 2017, 595: 191-200.

[2] Tfwala C M, Van Rensburg L D, Schall R, et al. Drought dynamics and interannual rainfall variability on the Ghaap plateau, South Africa, 1918—2014[J]. *Physics and Chemistry of the Earth*, 2018, 107: 1-7.

[3] Samuel J S, Henny A J V L. Hydrological drought characteristics based on groundwater and runoff across Europe[J]. *Proceedings of the International Association of Hydrological Sciences*, 2020, 383: 281-290.

[4] Zhang Y H, Ling F, Foody G M, et al. Mapping annual forest cover by fusing PALSAR/PALSAR-2 and MODIS NDVI during 2007—2016[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2019, 224: 74-91.

[5] Song Z J, Fu D S, Zhang X L, et al. MODIS AOD sampling rate and its effect on PM_{2.5} estimation in North China[J]. *Atmospheric Environment*, 2019, 209: 14-22.

[6] 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.

[7] 张静,任志远.基于 MOD16 的汉江流域地表蒸散发时空特征[J]. *地理科学*, 2017, 37(2): 274-282.

[8] 黄静,张运,汪明秀,等.近 17 年新疆干旱时空分布特征及影响因素[J]. *生态学报*, 2020, 40(3): 1077-1088.

[9] 程伟,辛晓平.基于 TVDI 的内蒙古草地干旱变化特征

分析[J]. *中国农业科学*, 2020, 53(13): 2728-2742.

[10] 杨玲,杨艳昭.基于 TVDI 的西辽河流域土壤湿度时空格局及其影响因素[J]. *干旱区资源与环境*, 2016, 30(2): 76-81.

[11] Kamble D B, Gautam S, Bisht H, et al. Drought assessment for kharif rice using standardized precipitation index (SPI) and vegetation condition index (VCI) [J]. *Journal of Agrometeorology*, 2019, 21(2): 182-187.

[12] Li Z Y, Han Y, Hao T Y. Assessing the consistency of remotely sensed multiple drought indices for monitoring drought phenomena in continental China[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2020, 99: 1-13.

[13] 汪左,王芳,张运.基于 CWSI 的安徽省干旱时空特征及影响因素分析[J]. *自然资源学报*, 2018, 33(5): 853-866.

[14] Zormand S, Jafari R, Koupaie S S. Assessment of PDI, MPDI and TVDI drought indices derived from MODIS Aqua/Terra Level 1B data in natural lands[J]. *Natural Hazards*, 2017, 86(2): 757-777.

[15] 聂艳,马泽玥,周逍峰,等.阿克苏河流域土壤湿度反演与监测研究[J]. *生态学报*, 2019, 39(14): 5138-5148.

[16] 杨涛,官辉力,李小娟,等.土壤水分遥感监测研究进展[J]. *生态学报*, 2010, 30(22): 6264-6277.

[17] 田国珍,武永利,梁亚春,等.基于蒸散发的干旱监测及时效性分析[J]. *干旱区地理*, 2016, 39(4): 721-729.

[18] Mu Q, Heinsch F A, Zhao M, et al. Development of a global evapotranspiration algorithm based on MODIS and global meteorology data[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2007, 111: 519-536.

[19] Mu Q, Zhao M, Running S W. Improvements to a MODIS global terrestrial evapotranspiration algorithm [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2011, 115(8): 1781-1800.

[20] 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.

[21] Liaqat U W, Choi M. Accuracy comparison of remotely sensed evapotranspiration products and their associated water stress footprints under different land cover types in Korean peninsula[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2016, 155(1): 93-104.

[22] Zhang T, Peng J, Liang W, et al. Spatial-temporal patterns of water use efficiency and climate controls in China's Loess Plateau during 2000—2010[J]. *Science of the Total Environment*, 2016, 565: 105-122.

[23] Zolotokrylin A N, Titkova T B, Luis Brito-Castillo. Wet and dry patterns associated with ENSO events in the Sonoran Desert from, 2000—2015[J]. *Journal of Arid Environments*, 2016, 134: 21-32.

[24] Bai J J, YU Y, Di L P. Comparison between TVDI and CWSI for drought monitoring in the Guanzhong Plain, China[J]. Journal of Integrative Agriculture, 2017, 16(2): 389-397.

[25] 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.

[26] 李虹雨,马龙,刘廷玺,等.1951—2014 年内蒙古地区气温、降水变化及其关系[J].冰川冻土,2017,39(5): 1098-1112.

[27] Jackson R, Idso S, Reginato R, et al. Canopy temperature as a crop water stress indicator[J]. Water Resources Research, 1981, 17(4): 1133-1138.

[28] Jackson R, Kustas W, Choudhury B. A reexamination of the crop water stress index[J]. Irrigation Science, 1988, 9(4): 309-317.

[29] Hurst H E. Long-term storage capacity of reservoirs [J]. Transactions of the American Society of Civil Engineers, 1951, 116(1): 770-799.

[30] 张强,邹旭恺,肖风劲,等.GB/T 20481—2017 气象干旱等级[M].北京:中国标准出版社,2017.

[31] 阿迪来·乌甫,玉素甫江·如素力,热伊莱·卡得尔,等.基于 MODIS 数据的新疆地表蒸散量时空分布及变化趋势分析[J].地理研究,2017,36(7):1245-1256.

[32] 赵舒怡,宫兆宁,刘旭颖.2001—2013 年华北地区植被覆盖度与干旱条件的相关分析[J].地理学报,2015,70(5):717-729.

[33] 张翔,朱晓昱,沈贝贝,等.呼伦贝尔植被蒸散发时空变化研究[J].中国农业资源与区划,2020,41(4):308-316.

[34] 张煦庭,潘学标,徐琳,等.基于降水蒸发指数的 1960—2015 年内蒙古干旱时空特征[J].农业工程学报,2017, 33(15):190-199.

[35] 刘继遥,春喜,梁文军,等.基于 SPI 指数的内蒙古干旱时空分布特征研究[J].内蒙古师范大学学报(自然科学汉文版),2016,45(4):533-539.

[36] 崔俊杰,白洁,郑磊,等.新疆地区遥感、融合和陆面模式模拟的蒸散产品的不确定性分析[J].干旱区研究, 2018,35(3):597-605.

[37] 黄文琳,张强,孔冬冬,等.1982—2013 年内蒙古地区植被物候对于干旱变化的响应[J].生态学报,2019,39(13): 4953-4965.

(上接第 221 页)

[25] 程立平,王亚萍,刘沛松,等.基于稳定同位素的黄土塬区村庄涝池对地下水补给的定量分析[J].水土保持通报,2021,41(5):60-66.

[26] 万彦博,师庆东,戴岳,等.沙漠腹地天然绿洲不同林龄胡杨水分利用来源[J].应用生态学报,2022,33(2): 353-359.

[27] 李涛,彭丽萍,师庆东,等.新疆准噶尔盆地不同径级梭梭和白梭梭的水分来源[J].生态学报,2020,40(6): 2099-2110.

[28] Wu X, Zheng X J, Yin X W, et al. Seasonal variation

in the groundwater dependency of two dominant woody species in a desert region of Central Asia[J]. Plant and Soil, 2019, 444(10): 39-55.

[29] 王勇,赵成义,王丹丹,等.塔里木河流域不同林龄胡杨与怪柳的水分利用策略研究[J].水土保持学报,2017, 31(6):157-163.

[30] 陈小丽,陈亚宁,陈亚鹏,等.黑河下游荒漠河岸林植物水分利用关系研究[J].中国生态农业学报,2014,22(8):972-979.

[31] 赵之旭,陈玉桂,邱池美,等.腾格里沙漠沙生植物梭梭根系的研究[J].陕西林业科技,2013,1(3):6-8.

(上接第 230 页)

[30] Bai J H, Deng W, Zhu Y M, et al. Spatial variability of nitrogen in soils from land/inland water ecotones [J]. Communications in Soil Science and Plant Analysis, 2004, 35(5/6): 735-749.

[31] 董乙强,孙宗玖,安沙舟,等.禁牧对中度退化伊犁绢蒿荒漠草地土壤养分的影响[J].草地科学,2016,33(8): 1460-1468.

[32] 邵新庆,石永红,韩建国,等.典型草原自然演替过程中土壤理化性质动态变化[J].草地学报,2008,16(6):566-571.

[33] 张丽,张磊,鲁剑巍,等.添加尿素和秸秆对三熟制水旱轮作土壤各形态氮素的影响[J].土壤,2017,49(1):13-18.

[34] 蒋跃利,赵彤,闫浩,等.宁南山区不同草地土壤原位矿

化过程中氮素的变化特征[J].环境科学,2014,35(6): 2365-2373.

[35] 高丽娟,吕光辉,王芸,等.艾比湖地区盐生植物群落土壤氮素的垂直分布特征[J].干旱区研究,2014,31(1): 51-56.

[36] 张雪梅.干旱区盐生植物的土壤氮素特征研究[D].乌鲁木齐:新疆大学,2011.

[37] 张斌,张福韬,陈曦,等.土壤有机质周转过程及其矿物和团聚体物理调控机制[J].土壤与作物,2022,11(3): 235-247.

[38] 赵丹阳,毕华兴,侯贵荣,等.晋西黄土区典型林地土壤水分变化特征[J].水土保持学报,2021,35(1):181-187.