DOI: 10.5846/stxb202110122864
吴天晓,李宝富,郭浩,王云倩,朱艳冰,廉丽姝.基于优选遥感干旱指数的华北平原干旱时空变化特征分析.生态学报,2023,43(4):1621-1634.
Wu T X, Li B F, Guo H, Wang Y Q, Zhu Y B, Lian L S.Analysis of drought variation characteristics in North China Plain based on optimized remote sensing drought index.Acta Ecologica Sinica,2023,43(4):1621-1634.

基于优选遥感干旱指数的华北平原干旱时空变化特征分析

吴天晓[1],李宝富[1,2,*],郭　浩[1],王云倩[1],朱艳冰[1],廉丽姝[1]
1 曲阜师范大学地理与旅游学院,日照　276826
2 曲阜师范大学黄河生态研究院,日照　276826

摘要:基于中分辨率成像光谱仪(MODIS)产品和气象资料,对比分析了作物缺水指数(CWSI)、干旱严重度指数(DSI)、归一化植被供水指数(NVSWI)和温度植被干旱指数(TVDI)表征华北平原干旱状况的适用性,并基于优选后的指数研究了 2000—2018 年干旱的时空变化特征。结果表明:(1)CWSI 在反映干旱的效果上明显优于另外三种干旱指数。(2)时间上,2000—2018 年春季干旱最严重,其次是秋季和冬季,夏季干旱最轻,但春季干旱强度有所下降,速率为-0.03/10a,而其他三季均呈增加趋势,速率为(0.01—0.08)/10a。(3)空间上,华北平原东部和东南部发生轻旱频率高,西部和北部中旱及以上干旱频率较高。山东省西北部及河南省东部、安徽省北部等地春旱呈显著减弱趋势($P<0.05$);夏季华北平原东南部干旱增加趋势显著($P<0.05$),而北部减弱趋势显著($P<0.05$);秋季华北平原西南一带干旱上升趋势较大;冬季西部、中部及南部干旱增加趋势显著($P<0.05$)。

关键词:作物缺水指数;干旱指数;遥感;华北平原

Analysis of drought variation characteristics in North China Plain based on optimized remote sensing drought index

WU Tianxiao[1], LI Baofu[1,2,*], GUO Hao[1], WANG Yunqian[1], ZHU Yanbing[1], LIAN Lishu[1]
1 *School of Geography and Tourism, Qufu Normal University, Rizhao* 276826, *China*
2 *Institute of Yellow River Ecology, Qufu Normal University, Rizhao* 276826, *China*

Abstract: Based on Moderate-resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) products and meteorological data, the applicability of crop water shortage index (CWSI), drought severity index (DSI), normalized vegetation water supply index (NVSWI) and temperature vegetation dryness index (TVDI) to characterize the drought condition in North China Plain was compared and analyzed. The spatio-temporal variation characteristics of drought from 2000 to 2018 were studied based on the optimized index. The results showed that: (1) the CWSI was significantly better than the other three drought indexes in reflecting drought. (2) In terms of time, the drought was the most serious in spring from 2000 to 2018, followed by autumn, winter and summer. However, the drought intensity of North China Plain decreased in spring at a rate of -0.03/10a, while the other three seasons showed an increasing trend at a rate of (0.01—0.08)/10a. (3) Spatially, the frequency of light aridity was high in the east and southeast of North China Plain, and the frequency of moderate aridity and above in the west and north was high. The spring aridity in the northwest of Shandong Province, the east of Henan Province and the north of Anhui Province showed a significant weakening trend ($P<0.05$); In summer, the aridity in the southeast of North China Plain increased significantly ($P<0.05$), while it decreased significantly ($P<0.05$) in the north; In autumn, the

基金项目:山东省自然科学基金项目(ZR2020MD117, ZR2021YQ28)
收稿日期:2021-10-12;　　**网络出版日期**:2022-10-13
* 通讯作者 Corresponding author.E-mail: libf@qfnu.edu.cn

aridity in the southwest of North China Plain increased greatly; The aridity in the west, middle and south increased significantly in winter ($P<0.05$).

Key Words: crop water stress index; drought index; remote sensing; North China Plain

在全球变暖的背景下,干旱严重威胁着经济社会的可持续发展和世界人民的生命财产安全[1]。全球每年由干旱所造成的经济损失约为60—80亿美元,远超其他自然灾害[2]。中国是农业大国,而干旱是影响农业经济的主要制约因素[3]。干旱作为自然灾害之一,正日益对我国粮食安全和生态安全造成严重威胁,并制约国民经济的发展[4]。因此,明确干旱的时空变化特征对提升防灾减灾水平至关重要。

目前表征干旱情势的指数已发展至近百种[5]。根据观测手段的不同,干旱指数可以分为站点观测和遥感监测指标两大类。基于气象站点资料的干旱指数计算过程相对简便,数据易获取,已成为当今干旱监测研究和实践应用的主要手段。然而,气象监测站点布设通常存在空间分布不均和站点迁移导致的观测数据时间一致性差等问题[1]。同时,气象站点监测数据更新周期较长且受人为干预较大,因此时效性较差[6]。而遥感技术具有覆盖范围广、实时性强以及对地观测、识别能力高的特点,在一定程度上克服了基于地面气象站点干旱监测方法涵盖范围有限的缺点[7],实现了面上干旱状况的定量化表征。尤其是以中分辨率成像光谱仪(MODIS)资料为基础的一系列遥感干旱指数,实现了对我国部分区域的农业干旱监测,具有较高的时间和空间分辨率。例如,Haboudane 等[8]提出的植被供水指数(VSWI)是一种较为简单的植被-温度作物旱情综合指数,对整个生长季旱情具有较好的响应[9],在业务化监测中已得到广泛的应用[10]。但是该指数只给出了研究区域的干旱数值,而没有干旱严重程度的真实含义。而 Abbas 等[11]对 VSWI 所表示的干旱严重程度进行了等级划分,提出了归一化植被供水指数(Normalized Vegetation Supply Water Index,NVSWI)。目前,NVSWI 已在多地得到了检验和应用[11—13]。Jackson 等[14]提出的作物缺水指数(CWSI)以热量平衡原理为基础,可反映一定的植被土壤水分情况,进而获取作物缺水信息[15—17]。Mu 等[18]提出了干旱严重程度指数(DSI),该指数考虑了蒸散发和植被状态,缓解了与粗分辨率相关的模型不确定性,使其精度得到有效提高,并被广泛运用于农业干旱监测[19—21]。Sandholt 等[22]基于地表温度和植被指数的关系提出了温度植被旱情指数(TVDI),该指数可有效模拟土壤水分,通过反演土壤湿度来反映农业干旱状况[23—25]。

可见,CWSI、DSI、NVSWI 和 TVDI 对农业干旱的监测均具有各自的优势,但在华北平原的适用性尚不明确。为了揭示华北平原农业干旱时空变化特征,同时避免遥感数据来源不同造成的误差,提高研究结果的可靠性。首先,运用 MODIS 传感器提供的蒸散发产品、植被指数和地表温度数据分别计算 CWSI、DSI、NVSWI 和 TVDI。然后,从不同角度评估各干旱指数对华北平原农业干旱监测能力的差异性,并以大型干旱事件对其进行验证。最后,基于优选后的干旱指数分析了 2000—2018 年华北平原干旱的时空变化特征,以期为该地区的农业生产和干旱的防治提供理论依据。

1 研究区概况

华北平原位于中国东部 30°59′—41°4′N 和 112°15′—122°40′E 之间(图 1),东临渤海黄海,西接太行山,北部是燕山山脉,南面是长江中下游平原。该区包含了河北、河南、山东、江苏、安徽五个省级行政区和北京、天津两个直辖市,面积约为 3×10^5 km^2,平均海拔 111 m。华北平原为温带季风气候,年平均气温 12—16℃,年降水量在 670—1080 mm 之间,且主要集中在 7、8 月份。

2 数据与方法

2.1 数据来源

为了避免数据来源差异对干旱指数监测能力的影响,本研究采用 MODIS 传感器提供的蒸散发产品、植被

指数和地表温度数据分别计算 CWSI、DSI、NVSWI 和 TVDI。其中,2000—2018 年归一化植被指数(NDVI)来源于美国国家航空航天局(NASA)的 MOD13A3 传感器。1 km 地表温度数据(LST)来源于 MOD11C3 传感器,2000—2014 年 500 m,8 d 分辨率与 2015—2018 年 0.05°,30 d 分辨率的蒸散发(ET)、潜在蒸散发(PET)数据都来源于 MOD16A2(http://www.ntsg.umt.edu/project/mod16 和 https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov/search/)。研究区所用的 MODIS 数据为 h26v04、h26v05、h27v04、h27v05 和 h28v05 五景影像。通过 ARCGIS 和 MRT 实现了数据的拼接、投影转换、重采样和裁剪。空间分辨率统一成 1 km,时间分辨率为月。

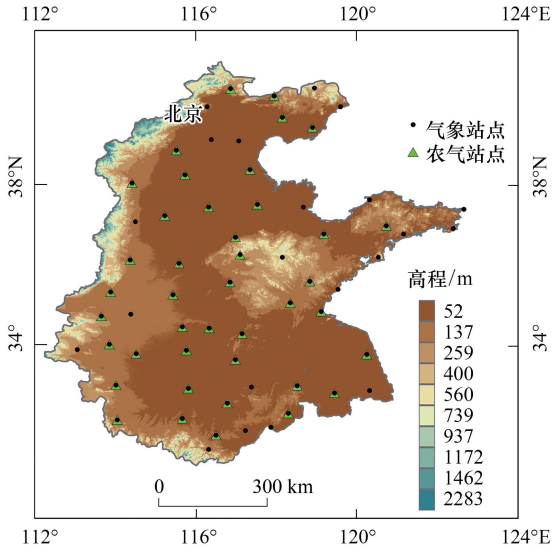

图 1　华北平原位置及站点分布图

Fig.1　Location and station distribution of North China Plain

国家气象局以 20 cm 深度土壤相对湿度作为农业干旱分级标准[26],同时鉴于数据的可获得性,选用华北平原 41 个农业气象观测站的 2000—2013 年逐旬 20 cm 土壤相对湿度数据,并将数据由逐旬合成逐月。气象数据包括 61 个气象站点 2000—2018 年逐月气温降水数据。土壤相对湿度数据和气象数据均来源于中国气象数据共享网(http://data.cma.cn/data/)。

2.2　研究方法

2.2.1　归一化植被供水指数(NVSWI)

Abbas 等[11]提出的归一化植被供水指数(NVSWI)综合了植被状态和表面温度信息,其原理同植被供水指数(VSWI)相同[8]:植被遭受干旱时,土壤水分亏缺导致叶片气孔部分关闭以维持冠层水分,导致蒸发散减少、地表温度增加。叶片枯萎对植被指数有负面影响。计算公式为:

$$\mathrm{NVSWI}=\frac{(\mathrm{VSWI}-\mathrm{VSWI}_{\min})}{(\mathrm{VSWI}_{\max}-\mathrm{VSWI}_{\min})}\times 100 \tag{1}$$

式中:NVSWI 为归一化植被供水指数,$\mathrm{VSWI}_{\min}$ 和 $\mathrm{VSWI}_{\max}$ 分别代表研究期间 VSWI 像元的最小和最大值。NVSWI 在 0—100 之间,值越大表示越湿润。NVSWI 在 20—40 之间为中旱,<20 为重旱及以上干旱程度。VSWI 是植被供水指数,其计算公式为:

$$\mathrm{VSWI}=\frac{\mathrm{NDVI}}{\mathrm{LST}} \tag{2}$$

式中:NDVI 是归一化植被指数,LST 是地表温度。

2.2.2　作物缺水指数(CWSI)

作物缺水指数法以能量平衡为基础,充分考虑下垫面的植被覆盖状况和地面风速、水汽压等气象要素[27]。CWSI 的计算公式为:

$$\mathrm{CWSI}=1-\frac{ET}{\mathrm{PET}} \tag{3}$$

式中:ET 和 PET 分别表示实际蒸散和潜在蒸散,CWSI 在 0—1 之间,值越大代表气候越干旱。

参考我国国家气象局采用的土壤相对湿度划分的农业干旱等级标准以及相关文献[28—29],将 CWSI 划分为如下几个等级,干旱分为如下几种类型(表 1)。

2.2.3　干旱严重度指数(DSI)

DSI 综合了归一化植被指数和蒸散量与潜在蒸散量的比值,其中归一化植被指数描述植被生长状况,蒸散量与潜在蒸散量的比值描述农作物受水分胁迫状况,计算公式为:

表 1 干旱等级划分

Table 1 The drought classification

等级 Grade	土壤相对湿度/% Soil relative humidity	作物缺水指数 CWSI	类型 Type	等级 Grade	土壤相对湿度/% Soil relative humidity	作物缺水指数 CWSI	类型 Type
1	>60	0—0.6	无旱	4	30—40	0.8—0.9	重旱
2	50—60	0.6—0.7	轻旱	5	<30	0.9—1.0	特旱
3	40—50	0.7—0.8	中旱				

CWSI:作物缺水指数 Crop water stress index

$$Z_{\mathrm{NDVI}}=\frac{\mathrm{NDVI}-\overline{\mathrm{NDVI}}}{\sigma_{\mathrm{NDVI}}} \tag{4}$$

$$Z_{ET/\mathrm{PET}}=\frac{ET/\mathrm{PET}-\overline{ET/\mathrm{PET}}}{\sigma_{ET/\mathrm{PET}}} \tag{5}$$

$$Z=Z_{\mathrm{NDVI}}+Z_{ET/\mathrm{PET}} \tag{6}$$

$$\mathrm{DSI}=\frac{Z-\bar{Z}}{\sigma_Z} \tag{7}$$

式中:NDVI 和 ET/PET 分别表示 2000—2018 年每月的植被指数和实际蒸散与潜在蒸散的比值, $\overline{\mathrm{NDVI}}$ 和 $\overline{ET/\mathrm{PET}}$ 分别代表每月 NDVI 和 ET/PET 的平均值, σ_{NDVI} 和 $\sigma_{ET/\mathrm{PET}}$ 分别代表 NDVI 和 ET/PET 的标准差。$\bar{Z}$ 和 σ_Z 分别代表 Z 的平均值和标准差。DSI 在-1.2—-0.9 之间表示中旱,<-1.2 表示重旱及以上干旱程度。

2.2.4 温度植被旱情指数(TVDI)

Sandholt 等[22]提出的 TVDI 计算公式如下:

$$\mathrm{TVDI}=\frac{Ts-Ts_{\min}}{Ts_{\max}-Ts_{\min}}\times 100 \tag{8}$$

$$Ts_{\max}=a+b\times\mathrm{NDVI} \tag{9}$$

$$Ts_{\min}=c+d\times\mathrm{NDVI} \tag{10}$$

式中: Ts 为地表温度, $Ts_{\max}$ 为某一 NDVI 对应的最大地表温度,即干边; $Ts_{\min}$ 为对应的地表温度的最小值,即湿边;a、b、c、d 分别为干湿边线性拟合方程的系数。TVDI 取值在 0—1 之间,TVDI 越大,旱情越严重。TVDI 在 0.6—0.8 之间表示中旱,>0.8 表示重旱及以上干旱程度。

2.2.5 标准化降水蒸散指数(SPEI)

基于站点的 SPEI 指数是一种相对成熟的理论体系,自 2015 年以后,被诸多学者应用于华北地区的干旱研究[30—33],公认性和可靠性也得以证实。其原理是对降水量与潜在蒸散量差值序列的累积概率值进行正态标准化,具体计算步骤参考有关文献[34]。SPEI 有多个时间尺度(1 月、3 月、6 月、12 月等),三个月时间尺度的 SPEI 可以反映季节的干旱(即农业干旱)情况[35]。

2.2.6 检验方法

为了检验不同遥感指数的农业干旱监测能力,特分析不同指数与 20 cm 深度的土壤相对湿度的相关性,以及与 SPEI 指数的相关系数(R)、均方根差(RMSD)、标准偏差(SD)。R 表示了不同指数与 SPEI、土壤相对湿度的相关性;RMSD 是干旱指数与 SPEI 之间的差值比例,量化了不同干旱指数与 SPEI 的离散程度,反映了干旱指数自身的离散程度[36]。

$$R=\frac{\sum_{i=1}^{n}(x_i-\bar{x})(y_i-\bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(x_i-\bar{x})^2(y_i-\bar{y})^2}} \tag{11}$$

$$\mathrm{RMSD} = \sigma_x^2 + \sigma_y^2 - 2\sigma_x \sigma_y R \tag{12}$$

$$SD = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(x_i - \bar{x})^2} \tag{13}$$

式中:x_i 为第 i 月的干旱指数,$\bar{x}$ 为干旱指数的平均值;y_i 为第 i 月的 SPEI/土壤相对湿度,$\bar{y}$ 为 SPEI/土壤相对湿度的平均值;σ_x^2 为干旱指数的方差,σ_y^2 为 SPEI 的方差,n 为总时长月数。

2.2.7　其他方法

采用 Sen 趋势分析干旱的强度变化趋势;采用 Mann-Kendall 方法检验干旱变化趋势的显著性;以不同干旱等级的像元数占华北平原总像元数的比值作为各等级干旱覆盖面积比;以不同干旱等级发生的月数占总月数的比值作为各等级干旱的频率;以 CWSI 数值作为干旱强度;对四种干旱指数进行了标准化处理,并用土壤相对湿度和 SPEI 检验。

3　结果与分析

3.1　干旱指数适用性评估

3.1.1　基于土壤相对湿度对干旱指数的检验

空间上,华北平原 41 个农气站的 CWSI、DSI、NVSWI 和 TVDI 与土壤相对湿度的相关性总体上以 CWSI 最高(图 2)。73.17%的站点 CWSI 与土壤相对湿度的相关性高于其他三种指数,尤以山东、江苏和河南地区的相关性较高。

2000—2013 年春季华北平原的 CWSI、DSI、NVSWI 和 TVDI 与土壤相对湿度的线性关系中(图 3),CWSI 与土壤相对湿度的相关性相对较高($R=-0.46$),但也未达到显著性水平。夏季,CWSI、DSI 和 NVSWI 与土壤相对湿度的相关系数均在 0.7 左右,且相关性达到 $P<0.01$的显著水平,而 TVDI 与土壤相对湿度的相关性不显著。秋季和冬季,CWSI 与土壤相对湿度的相关性最高($P<0.01$),其次是 DSI,而 NVSWI 和 TVDI 与土壤相对湿度的相关性均不显著。可见,CWSI 对土壤相对湿度的监测能力相对优于其他三种干旱指数。

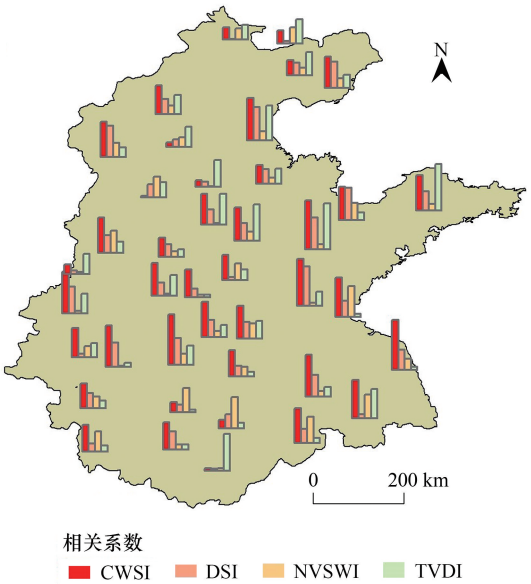

图 2　2000—2013 年逐月华北平原农气站点四种干旱指数与土壤相对湿度相关系数分布

Fig.2　Distribution of monthly correlation coefficients between four drought indexes and soil relative humidity at agrometeorological stations in North China Plain from 2000 to 2013

CWSI:作物缺水指数 Crop water stress index;DSI:干旱严重程度指数 Drought severity index;NVSWI:归一化植被供水指数 Normalized vegetation supply water index;TVDI:温度植被旱情指数 Temperature vegetation dryness index

3.1.2　基于 SPEI 对干旱指数的检验

从相关性来看(图 4),春季,CWSI($R=0.55$)与 SPEI 之间的相关性明显高于其余三种干旱指数($R<0.4$)。夏季,CWSI 与 SPEI 之间的相关性最高($R>0.8$)。秋季,各指数与 SPEI 相关性最好的为 CWSI($R=0.45$),其次为 DSI($R=0.29$),而 NVSWI 和 TVDI 与 SPEI 相关性不足 0.1。冬季,CWSI 和 DSI 与 SPEI 之间的相关性较高($R>0.58$),NVSWI 和 TVDI 与 SPEI 的相关性较低($R<0.2$)。

从均方根误差来看,春季,CWSI 与 SPEI 之间的离散程度最小(RMSD=0.92)。夏季,CWSI 与 SPEI 之间的离散程度最小(RMSD<0.6)。秋季,CWSI 与 SPEI 之间的离散程度稍小(RMSD=1.08),其余三种干旱指数与 SPEI 之间离散程度相对较大(RMSD>1.2)。冬季,CWSI 与 SPEI 之间离散程度最小(RMSD=0.88),其次

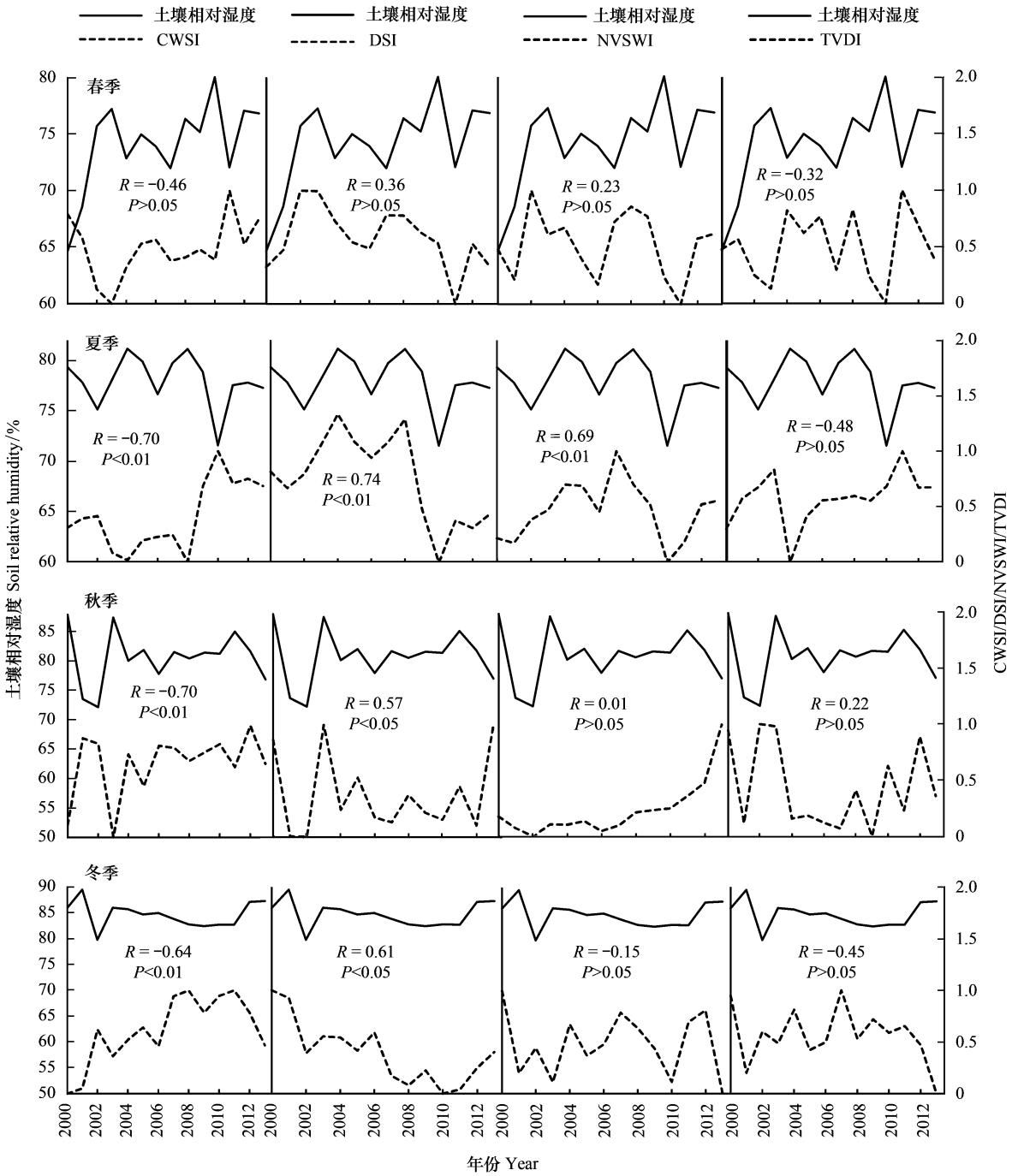

图 3 2000—2013 年华北平原各季节 CWSI、DSI、NVSWI 和 TVDI 与 20 cm 土壤相对湿度的对比

Fig.3 Comparison of CWSI, DSI, NVSWI and TVD with 20 cm soil relative humidity in all seasons in North China Plain from 2000 to 2013

为 DSI(RMSD=0.94),NVSWI 和 TVDI 与 SPEI 之间的离散程度相对较大(RMSD>1.2)。

从标准偏差来看,春季,CWSI、DSI 和 TVDI 的标准偏差较小,均在 0.9—1 之间,NVSWI 的标准偏差最大(SD=1.2)。夏季,CWSI 的标准偏差最小(SD=0.81),其次为 DSI(SD=0.83),NVSWI 和 TVDI 的标准偏差较大(SD>0.85)。秋季,TVDI 的标准偏差最小(SD=0.71),DSI 和 CWSI 的标准偏差差别不大,同时与 SPEI 的标准偏差最接近(SD=1.0)。冬季,CWSI 的标准偏差最小(SD=0.92),其余三种干旱指数的标准偏差差别不大,均在 1.0 左右。

基于以上分析可知,CWSI 与 SPEI 的干旱监测结果更为一致,这说明 CWSI 对研究区的干旱监测能力相对较好。

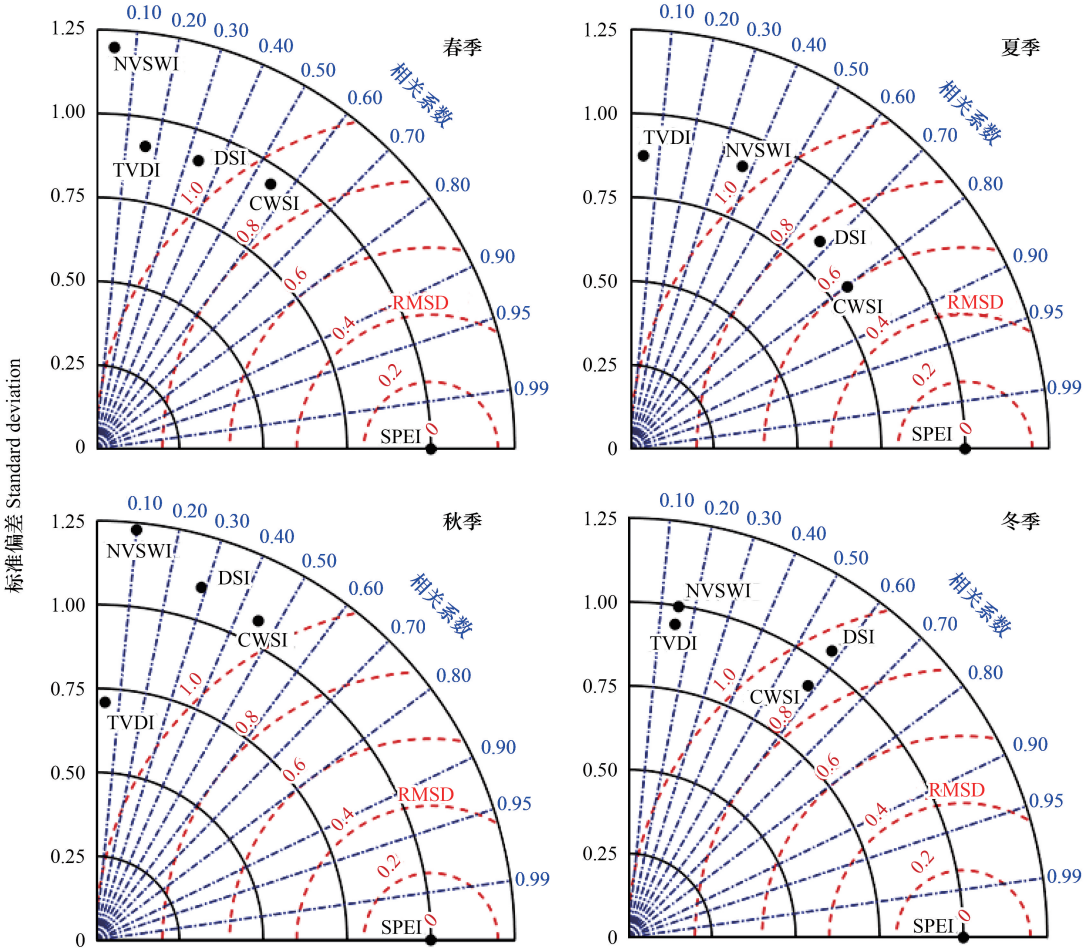

图 4　2008—2018 年华北平原各季节 CWSI、DSI、NVSWI 和 TVDI 与 SPEI 的泰勒图

Fig.4　Taylor diagrams of CWSI, DSI, NVSWI and TVDI with SPEI for all seasons in North China Plain from 2008 to 2018

SPEI:标准化降水蒸散指数 Standardized precipitation evapotranspiration index

3.1.3　大型干旱事件对干旱指数的检验

2010 年 10 月至次年的 2 月,华北平原由于持续的少雨发展成为中至重度农业干旱[37],大面积冬小麦受旱,河流多断流。图 5 华北平原 2010 年 10 月至 2011 年 2 月,该时间段内各月的 CWSI 偏高,均值超过0.80,即达到了重旱;DSI 该时间段的数值均超过 0.9,即监测到中旱的发生;NVSWI 也同样显示中旱,但 DSI 和 NVSWI 呈现的中旱时段更长,为 2010 年 10 月至次年 4 月;而 TVDI 未监测到较为严重的干旱。2002 年夏季,山东省经历了较为严重的干旱,据统计,此次旱情的受灾面积极大,近三成为重旱,且绝收面积达到了 30 万 hm^2[38]。图 5 山东省 2002 年 6—8 月,CWSI 超过 0.8,达到重旱的干旱等级;而 DSI、NVSWI 和 TVDI 的结果未能较好呈现较强的干旱程度。由此可见,CWSI 对部分重大干旱事件的监测效果较好。因此,本文基于 CWSI 研究华北平原 2000—2018 年的干旱时空变化特征。

3.2　干旱的时间变化特征

春季,华北平原 CWSI 的多年平均值为 0.75,呈不显著下降趋势,速率为-0.03/10a(图 6)。在各等级干旱频率中,轻旱的覆盖面积增加趋势不显著,中旱和重旱呈略减趋势,而特旱的覆盖面积显著减少($P<0.05$)。根据各等级干旱与 CWSI 的变化曲线图可知,特旱与 CWSI 的变化趋势最为相似,由此可以推断,春季的干旱

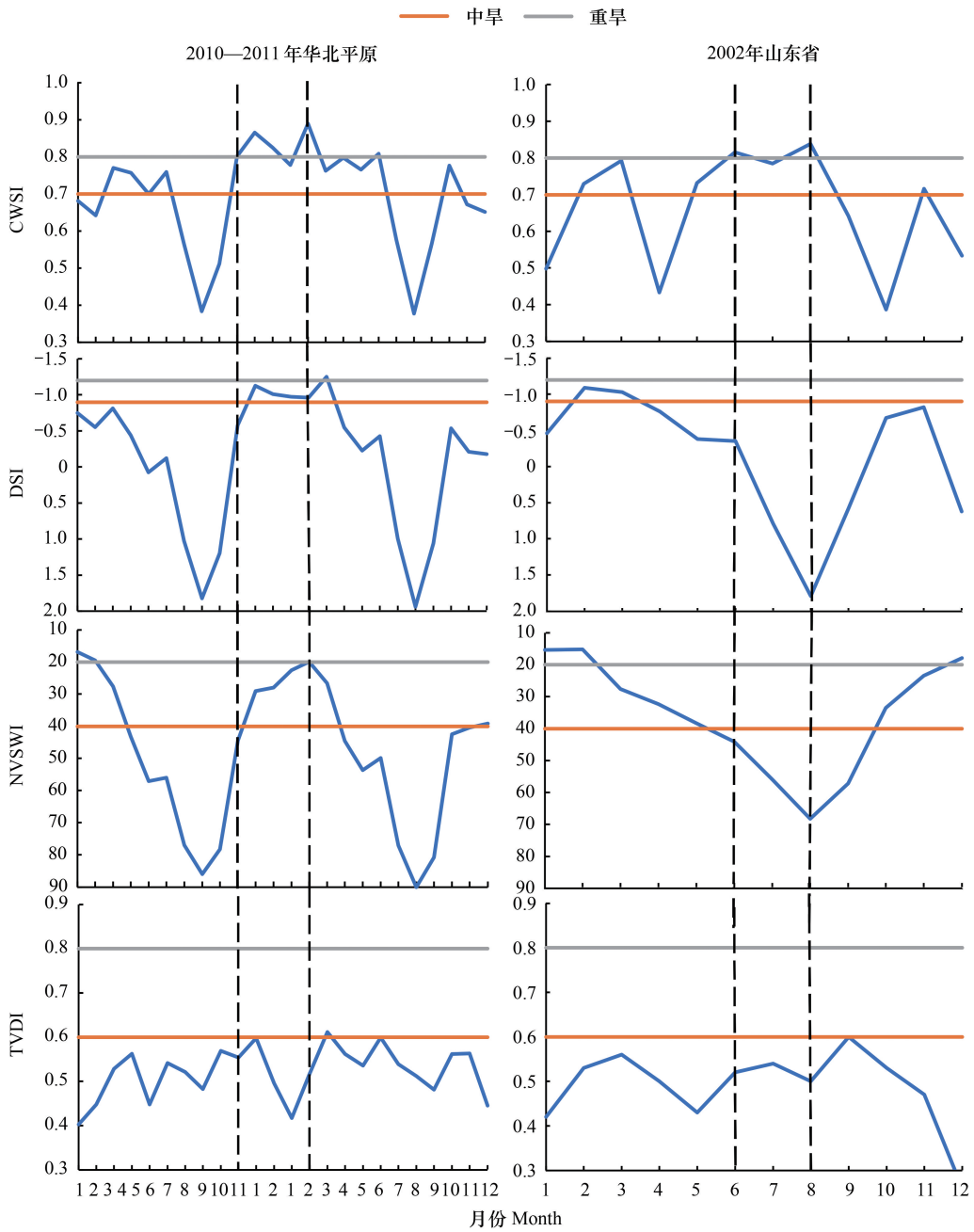

图 5 2010—2011 年华北平原和 2002 年山东省干旱事件对不同干旱指数的验证

Fig.5 Verification of different drought indexes by drought events in North China Plain from 2010 to 2011 and Shandong Province in 2002

最严重。夏季,CWSI 多年平均值最低(0.55),且呈不显著增加趋势,速率为 0.01/10a。轻旱、中旱、重旱和特旱的覆盖面积也均呈不显著增加态势。CWSI 的变化曲线与轻旱的变化趋势和波动较为一致,因此,夏季的干旱相对较轻。秋季,CWSI 多年平均值仅次于春季(0.70),呈不显著增加趋势,速率为 0.02/10a。轻旱、中旱和特旱的覆盖面积呈不显著增加趋势,而重旱呈不显著减少趋势。CWSI 的波动趋势在 2000—2006 年与中旱一致,2006 年以后与重旱较为一致,由此可见,秋季的旱情有加重的趋势。冬季,CWSI 均值低于秋季(0.65),且呈不显著增加趋势,速率为 0.08/10a。各等级的干旱覆盖面积均呈增加趋势,其中,特旱的增加趋势显著($P<0.05$)。CWSI 的变化趋势 2004 年以前与中旱较为一致,此后与重旱较为一致,这说明冬季的旱情也有加重的趋势。

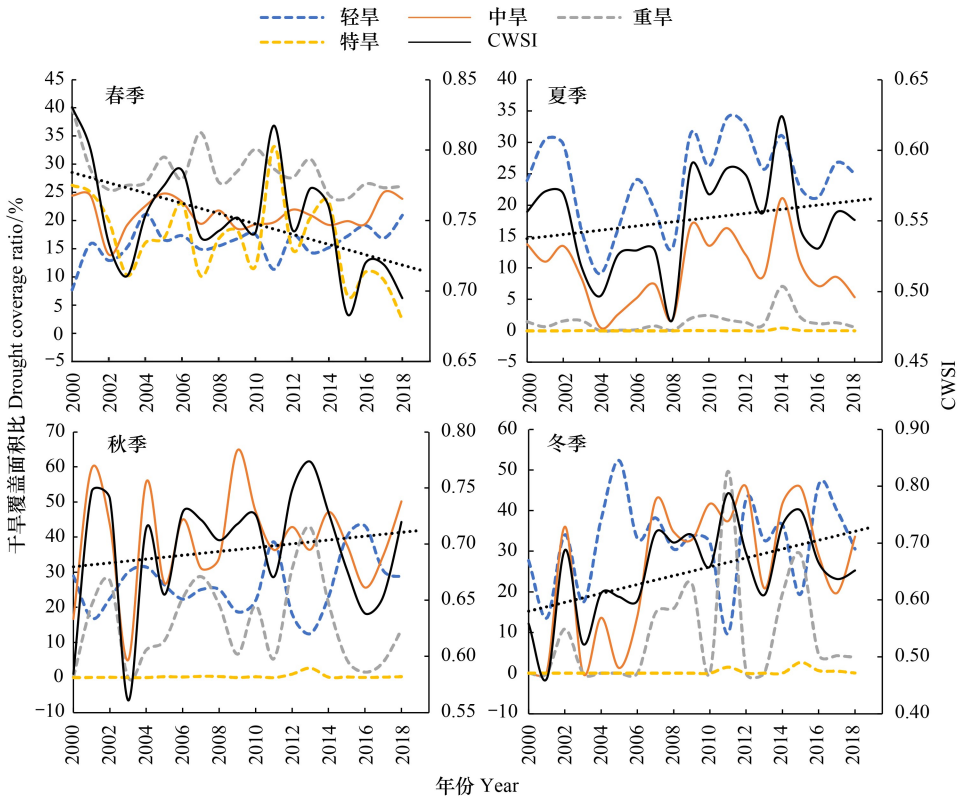

图 6　2000—2018 年华北平原各季节 CWSI 及各等级干旱覆盖面积变化特征

Fig.6　Variation Characteristics of CWSI and drought coverage at all levels in all seasons in North China Plain from 2000 to 2018

3.3　干旱的空间变化

3.3.1　干旱频率的空间分布

就干旱等级而言(图 7),轻旱的高发地区为华北平原的东部和东南部:春季江苏和安徽大部分地区、夏季华北平原西北部的河北省部分地区、秋冬季东南部的山东、江苏和安徽等地发生轻旱的频率较高。中旱的高发地区随季节变化由东向西迁移:春季中旱多发生于华北平原中部和南部的部分地区,而夏季中旱主要发生在山东半岛和安徽、江苏北部,秋季山东胶东、鲁中鲁南地区的中旱频率增加,冬季中旱频率高发区向北部和西北移动。重旱的高发区为东部和西北部:春季集中在山东省大部分地区,夏秋冬季大致分布于华北平原的西部和北部,并随季节变化逐渐向西北部集中。特旱的高发区主要位于华北平原的北部和西北部的河北省部分地区。

由此可见,华北平原南部和东部易发生轻旱,西部和北部易发生中旱及以上干旱。春季,华北平原的东部和北部易发生重旱及以上干旱;夏季的重旱及以上高发区相较于春季逐渐向西部和南部扩散,范围更广;秋季同夏季类似,重旱及以上的高发区主要分布于西北部;冬季也仍然以西北部为主要的重旱高发区,且相较于夏秋季,高发区分布更为集中。

3.3.2　干旱覆盖面积的空间分布

春季特旱(13.40%)主要分布在环渤海地区以及华北平原西北部的冀中和冀南地区(图 8);重旱(31.18%)多分布于山东省中南部及胶东半岛;中旱在河南省信阳市、安徽省六安市较为突出;轻旱在华北平原中部和南部均有零散分布。夏季,华北平原整体处于无旱状态。重旱、特旱和中旱较少(<7%),主要分布于渤海沿岸以及华北平原西北部,而轻旱(26.80%)在研究区北部分布较多。秋季,华北平原整体处于中旱状态。重旱和特旱(<6%)零散分布于东北部和西北部;中旱(47.20%)主要在平顶山-日照以北地区;研究区中南部(35.56%)处于轻旱状态。冬季,华北平原整体处于轻旱状态。中旱(28.53%)主要分布在郑州-滨州以

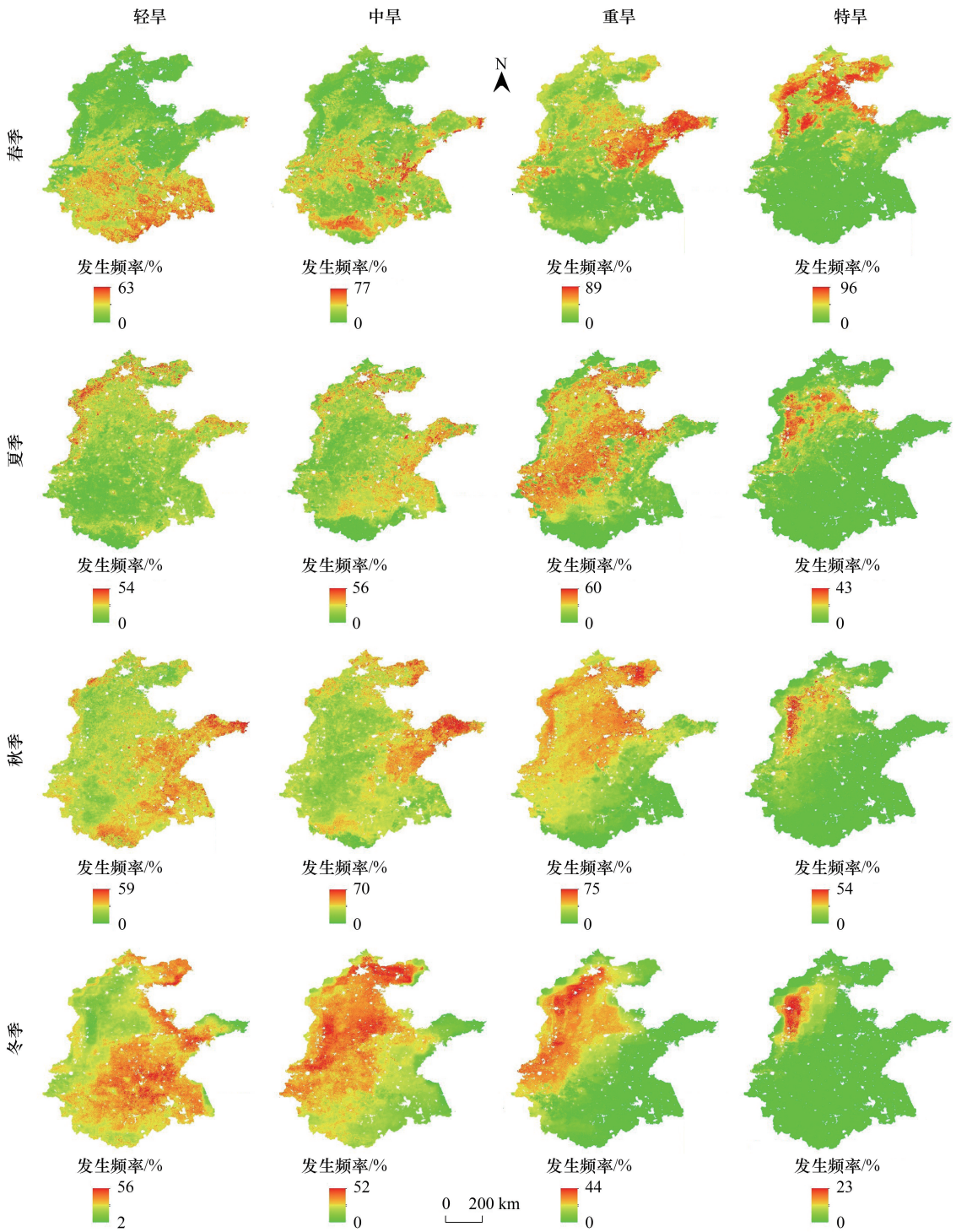

图 7 2000—2018 年华北平原各季节各等级干旱频率分布图

Fig.7 Distribution of aridity frequency at all levels in all seasons in North China Plain from 2000 to 2018

北地区;轻旱(45.16%)呈西南-东北向分布。

由春季至夏季,北部的特旱覆盖区多转变为中旱,重旱和中旱覆盖区转变为轻旱或不旱。到秋季,旱情加重,夏季的中旱覆盖区转为重旱,轻旱多转为中旱。至冬季,干旱缓解,中旱及以上干旱的覆盖面积减少。

3.3.3 干旱强度的空间变化趋势

华北平原不同季节干旱强度的变化趋势空间差异显著(图 9)。春季华北平原的干旱强度以下降为主,干

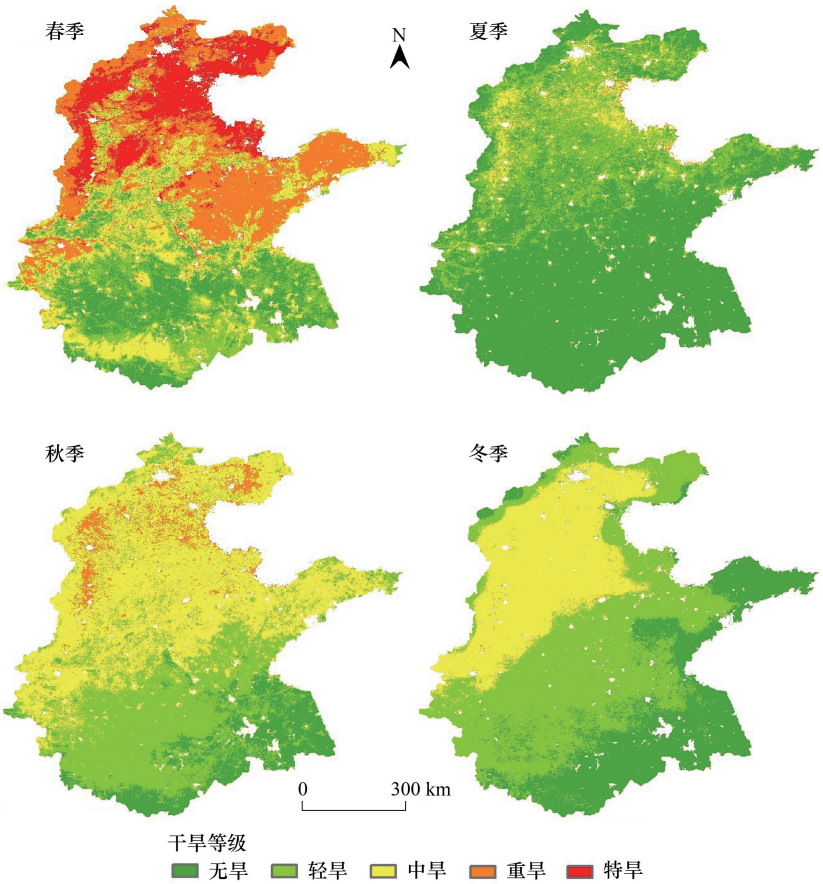

图 8　2000—2018 年华北平原各季节干旱覆盖面积空间分布图

Fig.8　Spatial distribution of aridity coverage in all seasons in North China Plain from 2000 to 2018

旱强度的趋势系数介于(-0.53—0.29)/10a,下降和上升趋势的面积分别占 82.31%和 17.69%。山东、河北和安徽部分地区的干旱强度上升趋势较明显,江苏中部的兴化市最大。研究区大部分地区(图 10)春季干旱有明显减弱趋势(P<0.05)。夏季的干旱强度以上升趋势为主(60.89%),以邯郸-潍坊为界,以南地区干旱强度上升趋势较大,其中河南省郑州市最大。夏季华北平原东南部干旱增加趋势显著(P<0.05),北部有显著的减弱趋势。秋季干旱强度以上升为主(62.76%),华北平原西南一带上升趋势较大,其中河北省邯郸市最大。零散分布于华北平原少数地区秋季干旱有显著增加趋势(P<0.05)。冬季绝大部分地区(97.60%)干旱强度上升,且南部、西部和中部地区尤为明显。研究区西部、中部及南部干旱增加趋势显著(P<0.05)。

4　讨论

本文基于 MODIS 数据计算了四种遥感干旱指数,从其与土壤相对湿度的时间和空间相关性、与 SPEI 相关系数、中心均方差、标准偏差方面对比了其在华北平原的适用性,并以研究区内的部分典型干旱事件对其进行验证,筛选出表现最佳的 CWSI。最后,基于 CWSI 探究了华北平原干旱的时空分布及变化特征。研究发现,干旱在华北平原的西北部、中部及山东半岛较为严重,这与周丹等[34]基于SPEI对华北地区近 50 年干旱发生强度特征分析的结果较为一致。余慧倩等[19]对华北地区干旱强度和发生时间的研究表明:干旱主要发生在春季和秋季。黄静等[39]对新疆干旱的时空分布研究得出新疆夏季干旱程度较大的结论。而本文的研究结果是干旱主要发生在春季,其次是秋季,再次是冬季,夏季干旱最少。造成这种差异的原因可能是新疆地区夏季气温高,降雨量少,且植被覆盖度较低,而华北平原降水主要集中在夏季,且植被茂密,蒸散作用较强。

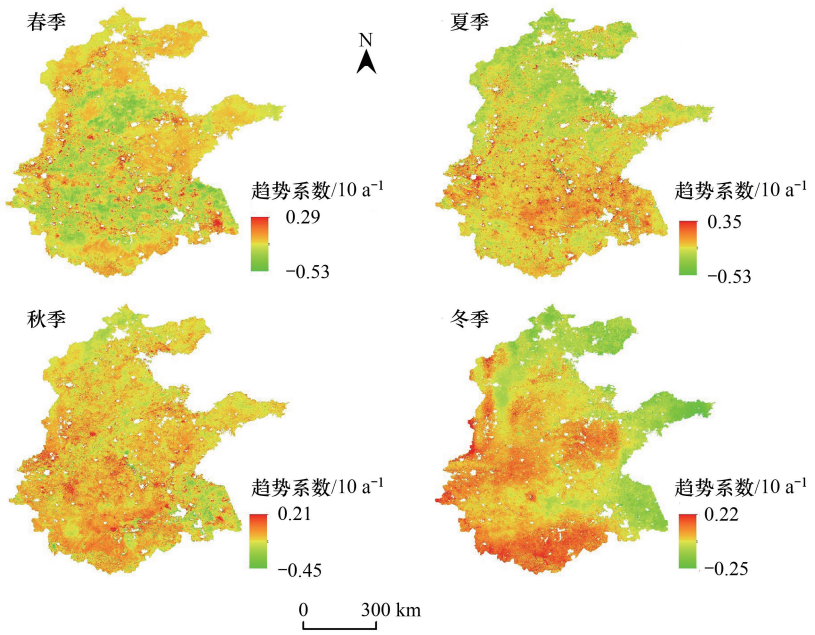

图 9 2000—2018 年华北平原各季节干旱强度变化趋势空间分布

Fig.9 Spatial distribution of aridity intensity change trend in all seasons in North China Plain from 2000 to 2018

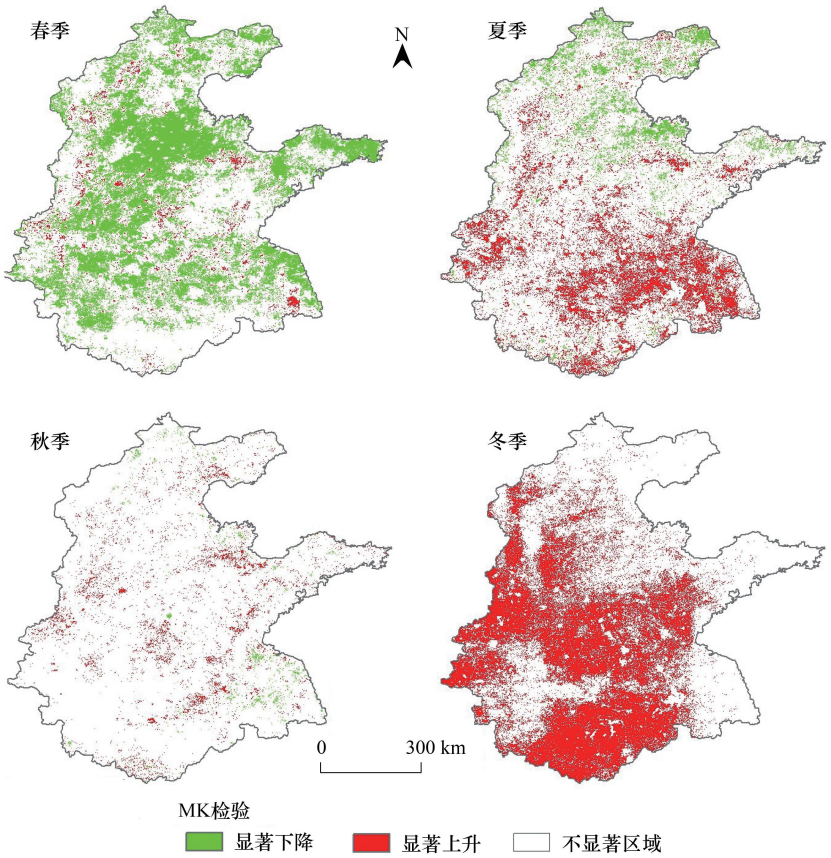

图 10 2000—2018 年华北平原各季节干旱强度变化显著性空间分布图

Fig.10 Spatial distribution of aridity intensity change significance in all seasons in North China Plain from 2000 to 2018

春季的干旱减弱趋势较明显,而夏季干旱最轻却有加重趋势,这可能与部分年份的夏季风提前有关,低层东亚夏季风北进提前,华北雨季开始偏早,春季降水增加,则春季的旱情缓解,夏季旱情增加[40]。我国干旱主要和气温大幅升高、降水变化不显著有关[41]。通过对有关研究[42—43]以及现有气象资料的分析发现,2000 年以后华北平原春季气温呈略微下降趋势,而夏、秋、冬季的气温明显增加;春秋季的降水呈增加趋势,而夏冬季的降水减少,这就解释了春季干旱下降,夏冬季干旱增加的结论。另外,秋季温度的明显升高会引起地表潜在蒸发的大幅增加[44],而秋季降水的增加幅度较小,因此,秋季干旱指数也呈增加趋势。

MODIS 数据时间分辨率和空间分辨率均较高,受卫星重访周期和天气的影响较小,以其为基础的各种遥感干旱指数在我国的农业干旱监测上运用广泛。CWSI 使用的 MOD16 蒸散发数据是由 Mu 等[45]改进算法计算而来,该算法增加了土壤热通量并改进气孔导度、空气动力阻力和边界层阻力等参数的估算,使数据的精度得到提高,在提供有关全球陆地水和能量循环以及环境变化的关键信息方面有较好的性能。因此,从数据来源和检验结果来看,CWSI 的准确性较高。但本文在评估干旱指数的适用性以及分析干旱的时空变化特征时并未考虑不同下垫面对结果的影响,这给研究结果带来一定的不确定性。因此后续研究将考虑不同土地利用类型以及土壤类型等方面的干旱指数适用性和干旱特征变化。

5　结论

(1)通过对比不同干旱指数(CWSI、DSI、NVSWI 和 TVDI)与土壤相对湿度、SPEI 的关系,结果表明 CWSI 在反映干旱的效果上相对优于另外三种干旱指数。

(2)时间上,2000—2018 年春季干旱最严重,其次是秋季和冬季,而夏季干旱最轻。春季干旱强度有所下降,速率为-0.03/10a,其他三季均呈增加趋势,速率为(0.01—0.08)/10a。春季轻旱的覆盖面积增加,中旱、重旱和特旱的覆盖面积减少;夏季四种等级的干旱覆盖面积均有增加;秋季轻旱、中旱和特旱的覆盖面积增加,而重旱减少;冬季各等级的干旱面积均有增加。

(3)空间上,华北平原的东部和东南部易发生轻旱,西部和北部易发生中旱及以上干旱。春季华北平原的干旱强度以下降为主,大部分地区春旱有明显减弱趋势;夏季的干旱强度以上升趋势为主,以邯郸-潍坊为界,以南地区干旱强度上升趋势较大,华北平原东南部干旱增加趋势显著,北部减弱趋势显著;秋季干旱强度以上升为主,华北平原西南一带上升趋势较大;冬季绝大部分地区干旱强度上升,且西部、中部及南部干旱增加趋势显著。

参考文献(References):

[1] 田丰, 武建军, 刘雷震, 杨建华. 1901—2015 年华北平原干旱时空转移特征及热点区域探测. 干旱区资源与环境, 2020, 34(6): 87-96.

[2] 姚玉璧, 张强, 李耀辉, 王莺, 王劲松. 干旱灾害风险评估技术及其科学问题与展望. 资源科学, 2013, 35(9): 1884-1897.

[3] 徐建文, 居辉, 刘勤, 杨建莹. 黄淮海地区干旱变化特征及其对气候变化的响应. 生态学报, 2014, 34(2): 460-470.

[4] 王劲松, 李耀辉, 王润元, 冯建英, 赵艳霞. 我国气象干旱研究进展评述. 干旱气象, 2012, 30(4): 497-508.

[5] Heim R R. A review of twentieth-century drought indices used in the United States. Bulletin of the American Meteorological Society, 2002, 83(8): 1149-1165.

[6] 马梓策. 华北地区干旱时空变化特征及其影响因素分析[D]. 呼和浩特: 内蒙古师范大学, 2020.

[7] 闫娜娜. 基于遥感指数的旱情监测方法研究[D]. 北京: 中国科学院研究生院(遥感应用研究所), 2005.

[8] Haboudane D, Miller J R, Pattey E, Zarco-Tejada P J, Strachan I B. Hyperspectral vegetation indices and novel algorithms for predicting green LAI of crop canopies: Modeling and validation in the context of precision agriculture. Remote Sensing of Environment, 2004, 90(3): 337-352.

[9] 刘晓璐, 周廷刚, 温莉, 吴浪, 张兰. 基于 VSWI 和 SPI 的 2000—2016 年河南省干旱特征研究. 干旱区地理, 2018, 41(5): 984-991.

[10] 丁建丽, 姚远. 干旱区稀疏植被覆盖条件下地表土壤水分微波遥感估算. 地理科学, 2013, 33(7): 837-843.

[11] Abbas S, Nichol J, Qamer F, Xu J C. Characterization of drought development through remote sensing: a case study in central Yunnan, China. Remote Sensing, 2014, 6(6): 4998-5018.

[12] Cong D M, Zhao S H, Chen C, Duan Z. Characterization of droughts during 2001—2014 based on remote sensing: a case study of Northeast China. Ecological Informatics, 2017, 39: 56-67.

[13] Sandeep P, Obi Reddy G P, Jegankumar R, Arun Kumar K C. Monitoring of agricultural drought in semi-arid ecosystem of Peninsular India through indices derived from time-series CHIRPS and MODIS datasets. Ecological Indicators, 2021, 121: 107033.

[14] Jackson R D, Idso S B, Reginato R J, Pinter Jr P J. Canopy temperature as a crop water stress indicator. Water Resources Research, 1981, 17(4): 1133-1138.

[15] 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. 自然资源学报, 2018, 33(5): 853-866.

[16] 王玉娟, 王树东, 曾红娟, 蔡明勇, 宋文龙. 基于作物缺水指数法的渭河流域干旱特征. 干旱区研究, 2014, 31(1): 118-124.

[17] 喻元. 基于 CWSI 与 TVDI 的关中地区干旱监测对比与干旱时空特征研究[D]. 西安: 陕西师范大学, 2015.

[18] Mu Q Z, Zhao M S, Kimball J S, McDowell N G, Running S W. A remotely sensed global terrestrial drought severity index. Bulletin of the American Meteorological Society, 2013, 94(1): 83-98.

[19] 余慧倩, 张强, 孙鹏, 宋长青. 干旱强度及发生时间对华北平原五省冬小麦产量影响. 地理学报, 2019, 74(1): 87-102.

[20] 童德明, 白雲, 张莎, 刘琦, 杨晋云. 干旱严重程度指数(DSI)在山东省干旱遥感监测中的适用性. 中国农业气象, 2020, 41(2): 102-112.

[21] Zhang J, Mu Q Z, Huang J X. Assessing the remotely sensed Drought Severity Index for agricultural drought monitoring and impact analysis in North China. Ecological Indicators, 2016, 63: 296-309.

[22] 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(2/3): 213-224.

[23] 刘宪锋, 朱秀芳, 潘耀忠, 李双双, 刘焱序. 农业干旱监测研究进展与展望. 地理学报, 2015, 70(11): 1835-1848.

[24] 覃艺, 张廷斌, 易桂花, 魏澎涛, 杨达. 2000 年以来内蒙古生长季旱情变化遥感监测及其影响因素分析. 自然资源学报, 2021, 36(2): 459-475.

[25] 王杰, 马佳丽, 解斐斐, 徐锡杰. 干旱地区遥感生态指数的改进——以乌兰布和沙漠为例. 应用生态学报, 2020, 31(11): 3795-3804.

[26] 中国气象局. GB/T 32136—2015 农业干旱等级. 北京: 中国标准出版社, 2016.

[27] 王玲玲, 张友静, 余远见, 邓世赞, 谢丽军. 遥感旱情监测方法的比较与分析. 遥感信息, 2010, 25(5): 49-53.

[28] 王纯枝, 毛留喜, 吕厚荃, 陈健, 宇振荣. 基于作物缺水指数的区域旱情遥感监测.中国气象学会 2007 年年会生态气象业务建设与农业气象灾害预警分会场论文集. 广州, 2007: 1183-1192.

[29] Ma Z C, Sun P, Zhang Q, Hu Y Q, Jiang W. Characterization and evaluation of MODIS-derived crop water stress index (CWSI) for monitoring drought from 2001 to 2017 over Inner Mongolia. Sustainability, 2021, 13(2): 916.

[30] 马尚谦, 张勃, 张佳琦, 潘志华, 吴乾慧, 黄浩, 杨梅. 标准化降水蒸散指数在华北平原的适用性分析. 中国农业资源与区划, 2020, 41(2): 235-245.

[31] 杨歆雨, 李栋梁. 中国华北东北强干旱事件的时空演变特征及重现期分析. 干旱区地理, 2019, 42(4): 810-821.

[32] 韦潇宇, 胡琦, 马雪晴, 郑诗然, 唐昕宁, 张玉莹, 潘学标, 何奇瑾. 基于 SPEI 的华北平原夏玉米生长季干旱时空变化特征. 干旱气象, 2018, 36(4): 554-560, 577.

[33] 杨思遥, 孟丹, 李小娟, 吴新玲. 华北地区 2001—2014 年植被变化对 SPEI 气象干旱指数多尺度的响应. 生态学报, 2018, 38(3): 1028-1039.

[34] 周丹, 张勃, 罗静, 张春玲, 安美玲, 王东. 基于 SPEI 的华北地区近 50 年干旱发生强度的特征及成因分析. 自然灾害学报, 2014, 23(4): 192-202.

[35] 李伟光, 侯美亭, 陈汇林, 陈小敏. 基于标准化降水蒸散指数的华南干旱趋势研究. 自然灾害学报, 2012, 21(4): 84-90.

[36] Wang X Z, Li B F, Chen Y N, Guo H, Wang Y Q, Lian L S. Applicability evaluation of multisource satellite precipitation data for hydrological research in arid mountainous areas. Remote Sensing, 2020, 12(18): 2886.

[37] 沈晓琳, 祝从文, 李明. 2010 年秋、冬季节华北持续性干旱的气候成因分析. 大气科学, 2012, 36(6): 1123-1134.

[38] 顾润源, 汤子东. 2002 年夏季山东干旱成因分析. 气象, 2004, 30(8): 22-26.

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

[40] 于晓澄, 赵俊虎, 杨柳, 支蓉, 封国林. 华北雨季开始早晚与大气环流和海表温度异常的关系. 大气科学, 2019, 43(1): 107-118.

[41] Liu Z P, Wang Y Q, Shao M G, Jia X X, Li X L. Spatiotemporal analysis of multiscalar drought characteristics across the Loess Plateau of China. Journal of Hydrology, 2016, 534: 281-299.

[42] 杨若子, 邢佩, 杜吴鹏, 党冰, 轩春怡, 熊飞麟. 1961—2017 年华北地区降水气候特征分析. 地理科学, 2020, 40(9): 1573-1583.

[43] 张皓, 冯利平. 近 50 年华北地区降水量时空变化特征研究. 自然资源学报, 2010, 25(2): 270-279.

[44] 马柱国, 符淙斌. 1951—2004 年中国北方干旱化的基本事实. 科学通报, 2006, 51(20): 2429-2439.

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