

# 1980 – 2019 年海河流域气象干旱和农业干旱变化及传播特征

相恺政<sup>1</sup>, 赵安周<sup>1,2</sup>, 胡小枫<sup>1</sup>, 张向蕊<sup>1</sup>

(1. 河北工程大学 矿业与测绘工程学院, 河北 邯郸 056038; 2. 邯郸市自然资源空间信息重点实验室, 河北 邯郸 056038)

**摘要:** 研究干旱演变和传播特征可为流域防灾减灾提供帮助和建议。以海河流域为例, 采用标准化降水蒸散发指数(*SPEI*) 和标准化土壤湿度指数(*SSMI*) 分别表征气象干旱和农业干旱, 并结合趋势分析和频率分析等方法, 对1980 – 2019年该流域气象干旱和农业干旱时空演变规律以及传播特征进行研究。结果表明: 在干旱发生频率上, 气象干旱和农业干旱的高发区分别集中在流域东北部和中部, 不同季节空间分布存在显著性差异, 春季和夏季为气象干旱频发季, 冬季和春季为农业干旱频发季; 从变化趋势上看, *SPEI* 值呈减小趋势的区域主要集中在流域的中东部, 其中春季减小趋势最为显著, 而*SSMI* 值呈“北增南减”的分布格局, 其中秋季减小趋势最为显著; 农业干旱对气象干旱的响应具有延时性, 不同季节差异显著, 夏季传播时间仅为5个月, 秋季、冬季和春季的传播时间分别为6、9和11个月; 在空间分布上, 春季和夏季的相关系数较低, 低值区主要分布在流域北部地区, 秋季和冬季的相关系数较高, 高值区集中分布在流域中部地区。

**关键词:** 气象干旱; 农业干旱; 时空演变; 干旱传播; *SPEI*; *SSMI*; 干旱特征; 海河流域

中图分类号: P426.616

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2022)02-0194-09

## Variation and propagation characteristics of the meteorological and agricultural drought in the Haihe River Basin from 1980 to 2019

XIANG Kaizheng<sup>1</sup>, ZHAO Anzhou<sup>1,2</sup>, HU Xiaofeng<sup>1</sup>, ZHANG Xiangrui<sup>1</sup>

(1. School of Mining and Geomatics Engineering, Hebei University of Engineering, Handan 056038, China;

2. Handan Municipal Key Laboratory of Natural Resources and Spatial Information, Handan 056038, China)

**Abstract:** The evolution and propagation characteristics of droughts are studied to provide help and advice for disaster mitigation and drought prevention in river basins. Standardized precipitation evapotranspiration index (*SPEI*) and standardized soil moisture index (*SSMI*) were adopted to characterize the meteorological drought and agricultural drought in the Haihe River Basin respectively. The trend and frequency analysis were also combined to study the spatio-temporal evolution and propagation characteristics of the droughts in this basin from 1980 to 2019. The results show that in terms of the frequency of droughts, the high-prone areas of the meteorological drought and agricultural drought were concentrated in the northeast and middle of the basin respectively. Meanwhile, the spatial distribution of different seasons was also significantly differentiated. Among them, spring and summer were the seasons with frequent meteorological droughts, whereas winter and spring were the seasons with frequent agricultural droughts. From the perspective of changing trends, the *SPEI* declined in the middle and eastern parts of the basin, which showed the most significant decrease in spring; however, the *SSMI* showed a pattern of “increasing in the north but decreasing in the south” with the most significant decline in autumn. There was a phenomenon of hysteresis in the response of the agricultural drought to meteorological drought, which varied

收稿日期: 2021-07-17; 修回日期: 2021-11-10

基金项目: 国家自然科学基金项目(42171212、42071246); 河北省自然科学基金项目(E2020402006); 河北省高等学校青年拔尖人才计划项目(BJ2018043); 2022年河北省硕士研究生创新项目(CXZZSS2022030)

作者简介: 相恺政(1998-), 男, 河北石家庄人, 硕士研究生, 主要从事干旱传播方面的研究。

通讯作者: 赵安周(1985-), 男, 河北邯郸人, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要从事植被对干旱的响应等方面的研究。

from season to season. The propagation only took 5 months in summer, but 6 months, 9 months and 11 months in autumn, winter and spring, respectively. In terms of spatial distribution, the correlation coefficient in spring and summer was lower compared with other seasons, which mainly distributed in the north of the basin, but higher in autumn and winter, which mainly concentrated in the middle of the basin.

**Key words:** meteorological drought; agricultural drought; spatio-temporal evolution; drought propagation; standardized precipitation evapotranspiration index (*SPEI*); standardized soil moisture index (*SSMI*); drought characteristics; the Haihe River Basin

## 1 研究背景

干旱是水循环过程中水分收支不平衡而导致的一种自然灾害,是农业生产和经济社会发展中的重大阻碍之一<sup>[1-2]</sup>。进入21世纪以来,在气候变暖和人类活动的双重胁迫下,全球诸多地区的干旱发生频率大幅提高,严重制约了人类生活和经济社会发展<sup>[3]</sup>。据统计,中国平均每年干旱事件波及耕地面积达 $2\,180 \times 10^4 \text{ hm}^2$ ,造成的粮食损失约 $160 \times 10^8 \text{ kg}$ <sup>[4-5]</sup>。地球系统模式表明,21世纪全球干旱发生概率将进一步增大<sup>[6]</sup>。因此干旱问题研究对经济社会发展有着至关重要的意义。

国际上通常将干旱划分为气象干旱、农业干旱、水文干旱和社会经济干旱4种主要类型。气象干旱主要是由于某时间跨度内降水稀少导致的,如果水资源没有得到有效补充,高温环境状态下的高额蒸发量会导致土壤水分减少和地表水位严重下降,进而引发农业干旱和水文干旱,最后造成严重的经济损失,因此将这一结果认为是气象干旱严重影响农业、水文和社会生态系统所致<sup>[7]</sup>。针对不同类型的干旱,国内外众多学者提出了一系列高效的评价指数对其进行监测<sup>[8]</sup>。其中常用于气象干旱监测的指数有相对湿度指数(*M*)、降水异常百分比(*Pa*)和标准化降水蒸散发指数(standardized precipitation evapotranspiration index, *SPEI*)等。其中,*SPEI*综合考虑了气候方面的因素与多尺度特征,在众多指数中应用最为广泛。如Wang等<sup>[9]</sup>利用全国427个气象站点数据计算得到了多时间尺度的日*SPEI*,并对全国干旱事件的严重程度、持续时间和频率进行了统计分析;史晓亮等<sup>[10]</sup>利用*SPEI*表征气象干旱,评价了多种植被遥感指数监测西南地区干旱的差异性。温度植被干旱指数(temperature vegetation dryness index, *TVDI*)、植被状态指数(vegetation index, *VGI*)和标准化土壤湿度指数(standardized soil moisture index, *SSMI*)等被广泛应用于农业干旱监测,其中*SSMI*不仅可以表征作物的取水状况,而且考虑到输入数据的空间分布以及

多时间尺度特征,因此在区域农业干旱监测中得到了广泛应用。如周洪奎等<sup>[11]</sup>通过对比*SSMI*、*SPEI*以及农业灾害记录,分析了采用*SSMI*监测农业干旱的适用性。此外,一系列研究表明水文干旱对气象干旱的响应随气候类型和季节的不同而呈现明显的差异性<sup>[7]</sup>。如Ding等<sup>[12]</sup>分析了中国不同气候区的气象干旱与水文干旱之间的传播时间差异性;Huang等<sup>[13]</sup>在分析干旱传递特征的过程中识别到水文干旱对气象干旱的滞后时间具有明显的季节特性。

综上所述,目前的研究多集中在气象、农业、水文干旱等单一干旱类型的演变态势以及气象干旱与水文干旱之间的传播特征,对气象干旱与农业干旱之间的传播特征关系的关注略显不足。基于此,本文以中国重要粮食生产区之一的海河流域为例,以*SPEI*和*SSMI*分别表征气象干旱和农业干旱,运用趋势分析等数理统计方法研究其时空演变态势,探讨气象干旱与农业干旱之间的传播特征,研究结果可为有关部门了解干旱演变机制、预防干旱的发生提供决策依据。

## 2 数据来源与研究方法

### 2.1 研究区概况

海河流域位于中国东部,地理位置在 $35^{\circ}01'N \sim 42^{\circ}45'N$ 、 $111^{\circ}57'E \sim 119^{\circ}51'E$ 之间,包含北京和天津两个直辖市、河北省的大部分地区以及山西、山东、内蒙古、辽宁、河南等省(自治区)的部分地区,在我国政治、经济方面具有重要地位。流域地势呈西北高,东南低,季风气候显著,属于雨热同期地区。多年平均温度约为 $10^{\circ}\text{C}$ ,多年平均降水量为 $500 \text{ mm}$ ,年内降水差异极大,80%的降水集中在5-10月。据《中国气象年鉴》等相关资料记载,该地区是中国干旱最为频发的地区之一。海河流域概况及气象站点分布见图1。

### 2.2 数据来源

气象数据采用中国地面气候资料月值数据集中的月平均气温和月累计降水量数据(<http://data.cma.cn/>),时间跨度为1980-2019年。上述气象站

点资料已经过严格的检验和校正,具有较高的精度,目前已被广泛应用于干旱方面的研究<sup>[14-15]</sup>。结合海河流域季节性特点以及气象学的通用划分规则,将整年划分为春季(3-5月)、夏季(6-8月)、秋季(9-11月)和冬季(12-次年2月)。

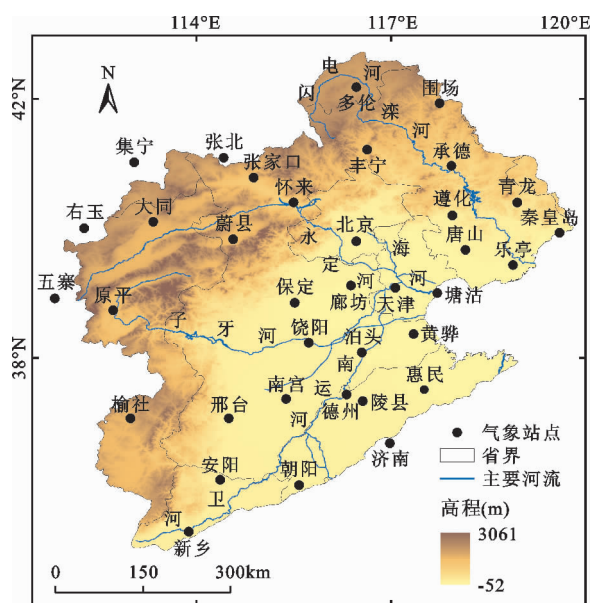


图1 海河流域概况及气象站点分布

土壤湿度数据选取 GLDAS (Global Land Data Assimilation System) 中的 Noah 陆地表面模型 2.0 和 2.1 版本的月尺度数据产品 (<https://disc.gsfc.nasa.gov/>)。该产品数据集中包含 0~10、10~40、40~100 和 100~200 cm 共 4 种土壤湿度数据,时间跨度为 1980-2019 年,空间分辨率为  $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ 。目前的研究表明 0~1 m 深度的土壤湿度可以满足大部分植物根部对水分的吸收<sup>[16]</sup>。因此,本研究采用 0~1 m 深度的土壤湿度数据来计算农业干旱。

## 2.3 研究方法

2.3.1 标准化降水蒸散发指数 (SPEI) SPEI 是由 Vicente-Serrano 等<sup>[17]</sup>提出的一种以降水量与蒸散量的差值表示干旱程度的指数,其中,潜在蒸散量计算采用 Thornthwaite 方法<sup>[18]</sup>,此指数不仅综合考虑了标准化降水指数 (standardized precipitation index, SPI) 的多尺度特点,而且具有帕默尔干旱指数 (Palmer drought severity index, PDSI) 对温度敏感的特点<sup>[5]</sup>。故本文采用 SPEI 分析气象干旱的时空演变态势,其具体计算原理参考文献<sup>[17]</sup>和<sup>[19]</sup>,同时将 SPEI 划分为 5 个干旱等级<sup>[20]</sup>,分别为无旱 (-0.5, 0)、轻度干旱 (-1.0, -0.5)、中度干旱 (-1.5, -1.0)、重度干旱 (-2.0,

-1.5]、极端干旱 ( $-\infty, -2.0$ )。

2.3.2 标准化土壤湿度指数 (SSMI) 对土壤湿度 (soil moisture, SM) 数据进行标准化前,必须对 SM 所符合的概率分布函数进行检验<sup>[21]</sup>,本文采用 Kolmogorov-Smirnov 法对 SM 进行检验,结果为正态分布,与 Mishra 等<sup>[22]</sup>的研究结果一致。故采用 SM 构建 SSMI 指数分析农业干旱时空演变态势,其计算公式如下:

$$SSMI = \frac{SM - \overline{SM}}{\sigma_{SM}} \quad (1)$$

式中:SSMI 为标准化土壤湿度指数;SM 为土壤湿度; $\overline{SM}$  为 1980-2019 年对应月份的 SM 均值; $\sigma_{SM}$  为 SM 的标准差。

2.3.3 频率分析 频率分析可用于表征气象干旱和农业干旱发生状态在空间方面的差异,具体计算方法参考文献<sup>[23]</sup>。

2.3.4 Sen 趋势 Sen 趋势是 Sen 等<sup>[24]</sup>提出的一种对长时间序列变化情况进行研究的斜率估计方法,对比简单线性回归模型,Sen 趋势可以降低异常值对数据的影响。故本文采用该方法分析气象干旱和农业干旱在像元尺度上的趋势变化空间分布情况,其计算公式如下:

$$\beta = \text{Median}\left(\frac{x_a - x_b}{a - b}\right) \quad (2)$$

式中: $\beta$  为变化趋势; $x_a$  和  $x_b$  分别为  $a$  和  $b$  时刻数据的数值。 $\beta > 0$  时, SPEI 或 SSMI 值表现为增大趋势,反之为减小趋势。同时采用 Mann-Kendall (M-K) 法对趋势变化的显著性进行检验<sup>[25]</sup>。

## 3 结果与分析

### 3.1 干旱特征变化分析

3.1.1 气象干旱发生频率 图 2 为 1980-2019 年海河流域气象干旱在年际和季节尺度发生频率的空间分布。从年际尺度来看(图 2(a)),海河流域常年遭受气象干旱的侵扰,整个流域干旱发生频率处于 25%~40% 之间,高值区集中在天津市、北京市和河北省东部环海地区。在季节尺度上(图 2(b)~2(e)),春季为气象干旱高发季,频率高值区主要集中在流域北部;夏季的气象干旱发生频率空间分布较为分散,高值区主要集中在流域北部的北京市、辽宁省和山西省等地;秋季的气象干旱发生频率相对较低,除流域西北部发生频率较高外,其他地区发生频率均为 30% 左右;冬季的气象干旱发生频率呈现由东向西递减的趋势,高值区主要集中在流域东北

部的环渤海一带。

3.1.2 农业干旱发生频率 1980 - 2019 年海河流域年际和季节尺度上农业干旱发生频率空间分布如图 3 所示。从年际尺度来看(图 3(a)),流域大部分地区农业干旱发生频率在 38% ~ 57% 之间,其中发生频率较高的地区主要分布在河北省中部。从季节变化来看(图 3(b) ~ 3(e)),春季农业干旱发生频

率相对较高,流域中、北部大部分地区的发生频率超过了 52%;夏季农业干旱发生频率相对较低,基本在 38% ~ 52% 之间;秋季流域中部以及东西部地区的农业干旱发生频率较高,处于 52% ~ 57% 之间,流域南部发生频率较低,仅为 31% ~ 38%;冬季农业干旱发生频率集中在 52% 以上,中部部分地区超过了 57%。

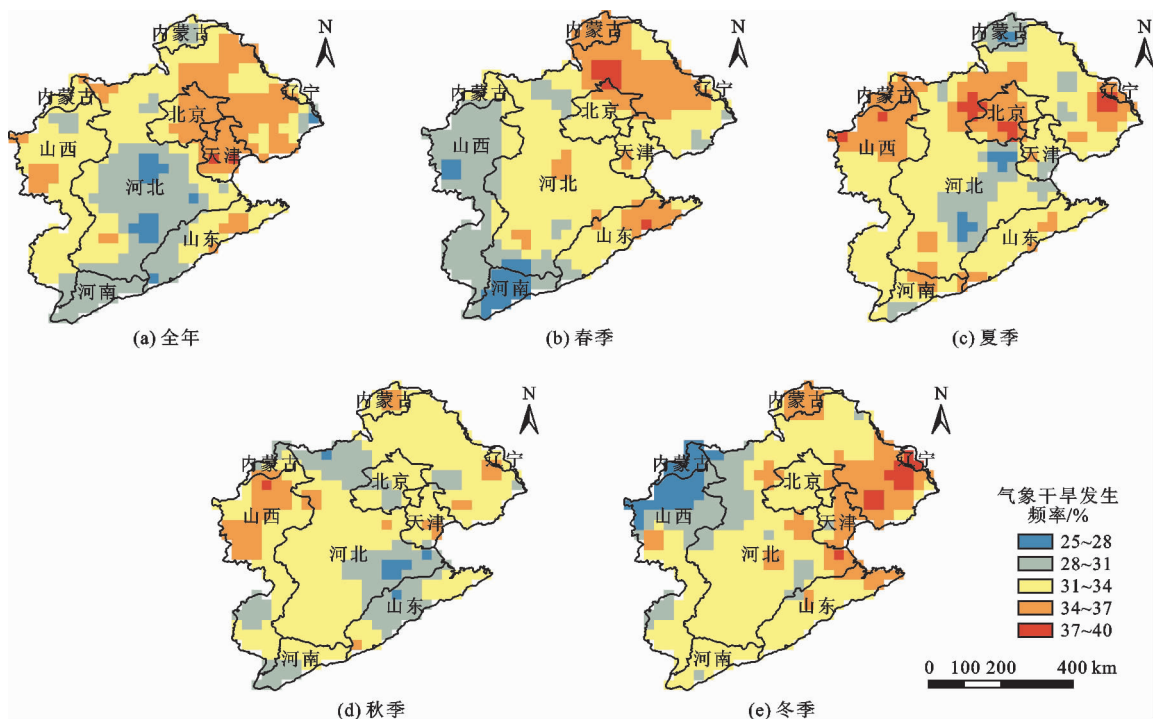


图 2 1980 - 2019 年海河流域年际和季节尺度气象干旱发生频率空间分布

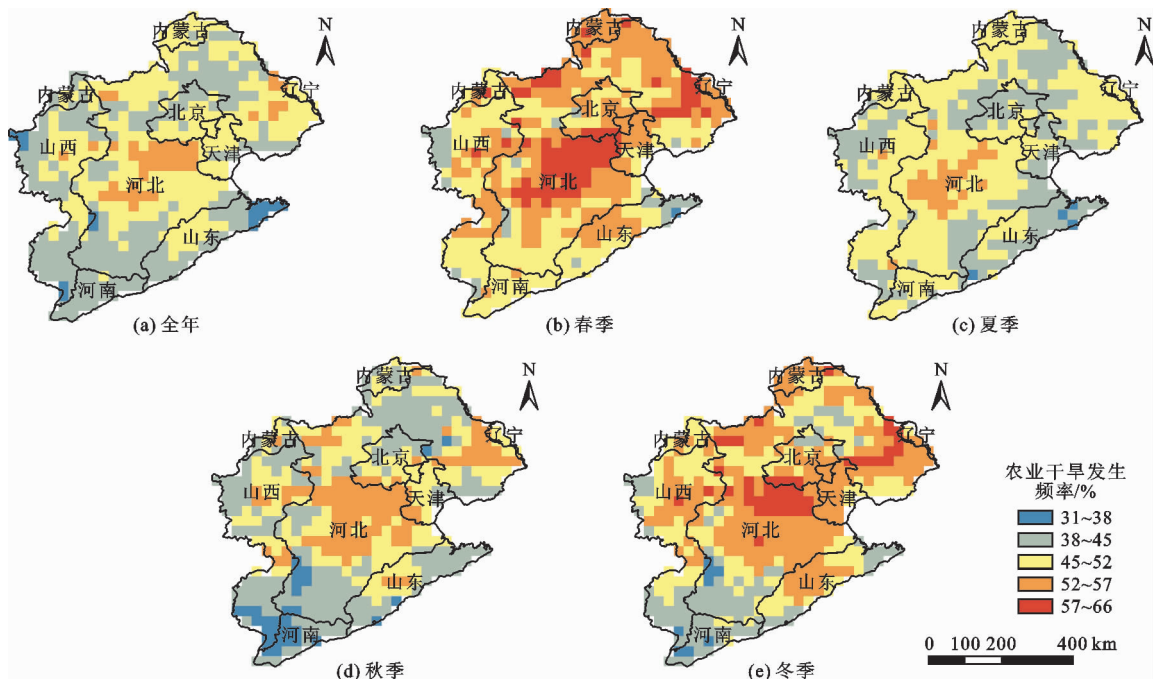


图 3 1980 - 2019 年海河流域年际和季节尺度农业干旱发生频率空间分布



通过对比气象干旱和农业干旱的发生频率可以发现,在空间分布上两者存在显著差异。以土壤湿度为衡量标准的农业干旱发生频率高于气象干旱,但是在时间上存在明显的滞后性,其中,春季和夏季为气象干旱频发季,而春季和冬季为农业干旱频发季。在空间地域差异方面,流域东北部和中部分别是气象干旱和农业干旱高发区。

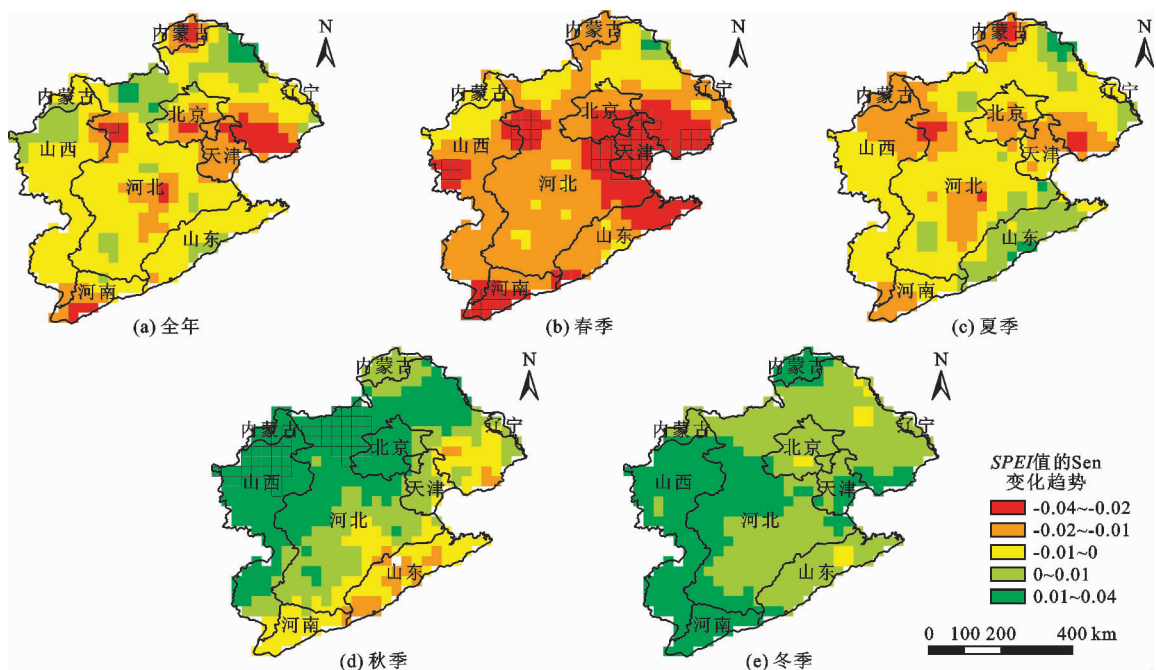
### 3.2 干旱演变趋势分析

**3.2.1 气象干旱变化趋势** 图4为1980–2019年海河流域 *SPEI* 在年际和季节尺度上的变化趋势空间分布。在年际尺度上(图4(a)),该流域 81.97% 地区的 *SPEI* 值呈减小趋势,其中通过 0.05 显著性检验的地区面积仅占流域的 0.19%,主要零星分布在流域的中北部。从不同季节 *SPEI* 的变化趋势来看(图4(b)~4(e)),在春季,超过 95% 地区的 *SPEI* 值呈减小趋势,其中呈显著减小趋势的面积达 11.39%,主要分布在流域东部的环海地区。从夏季 *SPEI* 变化趋势来看,海河流域的 *SPEI* 值减小趋势有所减弱,没有呈显著减小趋势的地区,可能是由于夏季降水量的增加,使得气象干旱状态有所缓解。*SPEI* 值在秋季表现为西北部增大、东南部减小的态势,呈增大和减小趋势的面积分别为 73.24% 和 26.76%,其中呈显著增大趋势的面积占 10.82%,主要分布在流域西北部。*SPEI* 值在冬季均呈轻微增加趋势。

**3.2.2 农业干旱变化趋势** 图5为1980–2019年

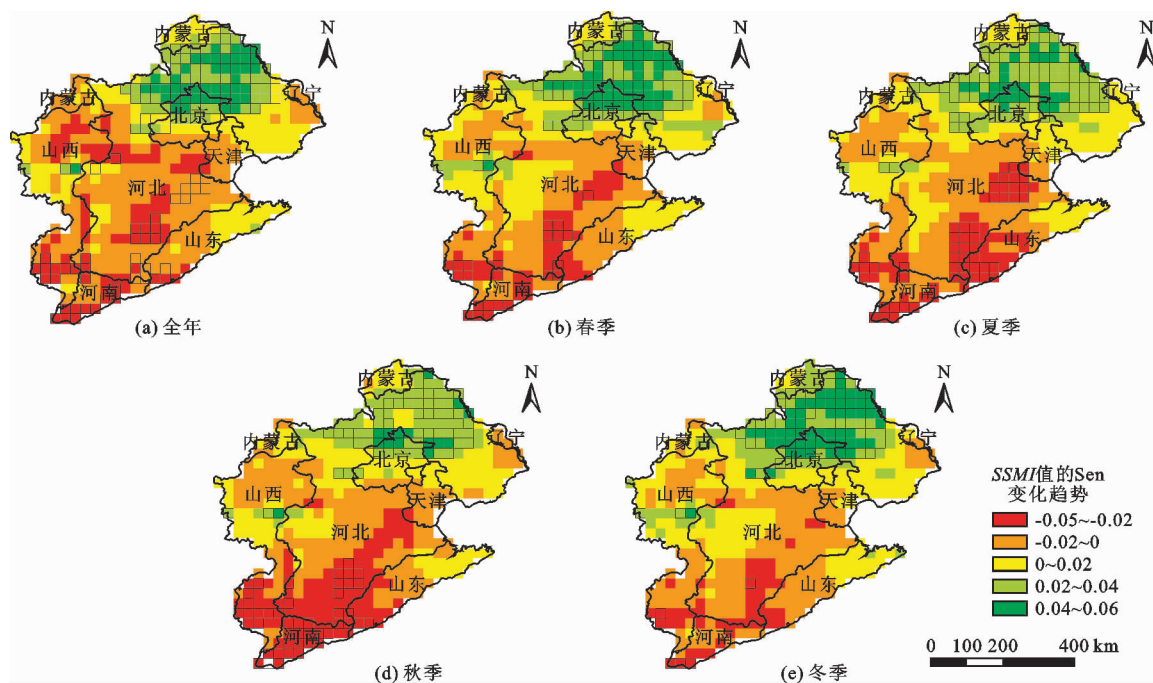
海河流域 *SSMI* 在年际和季节尺度上的变化趋势空间分布。在年际尺度上(图5(a)),整个流域 18.41% 地区的 *SSMI* 值呈显著增大趋势( $P < 0.05$ ),主要集中在流域北部;10.54% 地区的 *SSMI* 值呈显著减小趋势( $P < 0.05$ ),零散分布在流域西南部。从不同季节 *SSMI* 的变化趋势来看(图5(b)~5(e)),在春季, *SSMI* 值呈增大趋势的地区占整个流域的 55.20%,其中,呈显著增大趋势的地区占 33.70%,主要集中在流域北部,呈显著减小趋势的地区较少,仅为总面积的 4.17%,零散分布在流域南部;夏季 *SSMI* 值呈显著增大和减小趋势的地区面积均轻微增加,分别占流域总面积的 21.06% 和 9.30%,分别集中在流域北部和南部地区;秋季 *SSMI* 值呈显著增大和减小趋势的面积分别占流域总面积的 10.63% 和 8.35%,分别集中在流域北部和中南部地区;冬季 *SSMI* 值呈显著增大和减小趋势的面积分别占流域总面积的 17.08% 和 1.33%,其中显著增大的区域主要集中在流域北部,显著减小的区域零星分布在流域南部。

综合考虑两种类型干旱的演变趋势可以发现,整个流域在季节上仍存在滞后性,且地域差异明显。其中,春季的气象干旱严重化趋势最为明显,而农业干旱在夏季和秋季的干旱化趋势最为严重;在空间上,气象干旱整体呈加重趋势,仅有流域北部和西部的部分地区呈缓解态势,而农业干旱主要呈“北增南减”的分布格局。



注:框线内的像元表示通过 0.05 的显著性检验。

图4 1980–2019年海河流域 *SPEI* 在年际和季节尺度上的变化趋势空间分布



注:框线内的像元表示通过0.05的显著性检验。

图5 1980-2019年海河流域SSMI在年际和季节尺度上的变化趋势空间分布

### 3.3 气象干旱向农业干旱的传递特征分析

通过分析SSMI与SPEI在月尺度上的相关性,从而揭示气象干旱向农业干旱的传递特征,两者在月尺度上的相关系数矩阵如图6所示。由图6可见,干旱传播特征具有明显的季节性差异。整体上,相关系数高的月份集中在7-11月。在季节上,春季的SSMI与SPEI-11和SPEI-12的相关性最高,表明气象干旱向农业干旱的传播时间大约在11个月左右;夏季的SSMI与SPEI-12和SPEI-2的相关性最高,可能是由于气温升高和降水量增加,农业干旱对于气象干旱的响应速度加快,平均传播时间在5个月左右;秋季的SSMI与SPEI-5、SPEI-6和SPEI-7的相关性最高,可能是因为秋季降水减少,传播时间增加为6个月左右;冬季的SSMI与SPEI-8、SPEI-9和SPEI-10的相关性最高,可能是由于冬季天气较为寒冷,导致滞后时间的延长,传播时间增加至9个月。

为进一步探究气象干旱和农业干旱的关系,本文计算了不同时间尺度SPEI与SSMI在对应月份下相关系数空间分布,如图7所示。

由图7可以看出,在春季,河北省北部和中南部地区相关系数为0.4~0.6的面积占比从3月的12.81%增加至5月的24.47%,说明相关系数在逐渐减小,可能是由于春季气温开始逐渐回升,以及河北省北部、中南部地区主要植被类型为林地、草地和

耕地,植被开始生长,需水量增大,从而导致土壤湿度降低。夏季的相关系数达到全年最低(平均为0.56),6月的中、低相关系数面积占比达到58.45%,可能是植被生长发育摄取了大量的水分所致。在秋季,除了河北省北部以及中部小部分地区为中等相关系数之外,其他地区基本均为较高的相关系数(0.6~0.8)以及高相关系数(0.8~1.0),其中高相关系数主要集中分布在海河流域中部以及东西部小部分地区。冬季的情况与秋季基本类似,除了小部分地区的植被仍存在生长情况,大部分地区植被都处于休眠状态,具有较高的相关系数。

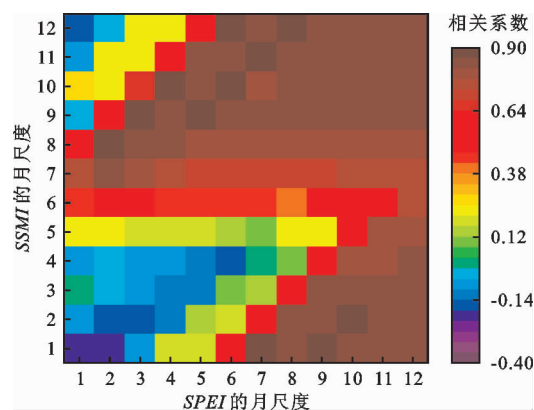


图6 海河流域SSMI与SPEI在月尺度上的相关系数矩阵

综合上述分析认为,整个海河流域的气象干旱

与农业干旱之间的传播时间随季节不同而差异明显,夏季、秋季、冬季和春季的传播时间依次为 5、6、9 和 11 个月,符合海河流域温带季风气候的特点。在空间分布上,具有明显的季节差异,除了春季和夏

季的流域北部、中部以及南部地区处于中等相关系数之外,其他地区相关系数基本较高,秋季和冬季的相关系数普遍较高,其中,高相关系数集中在流域中部以及东西部小部分地区。

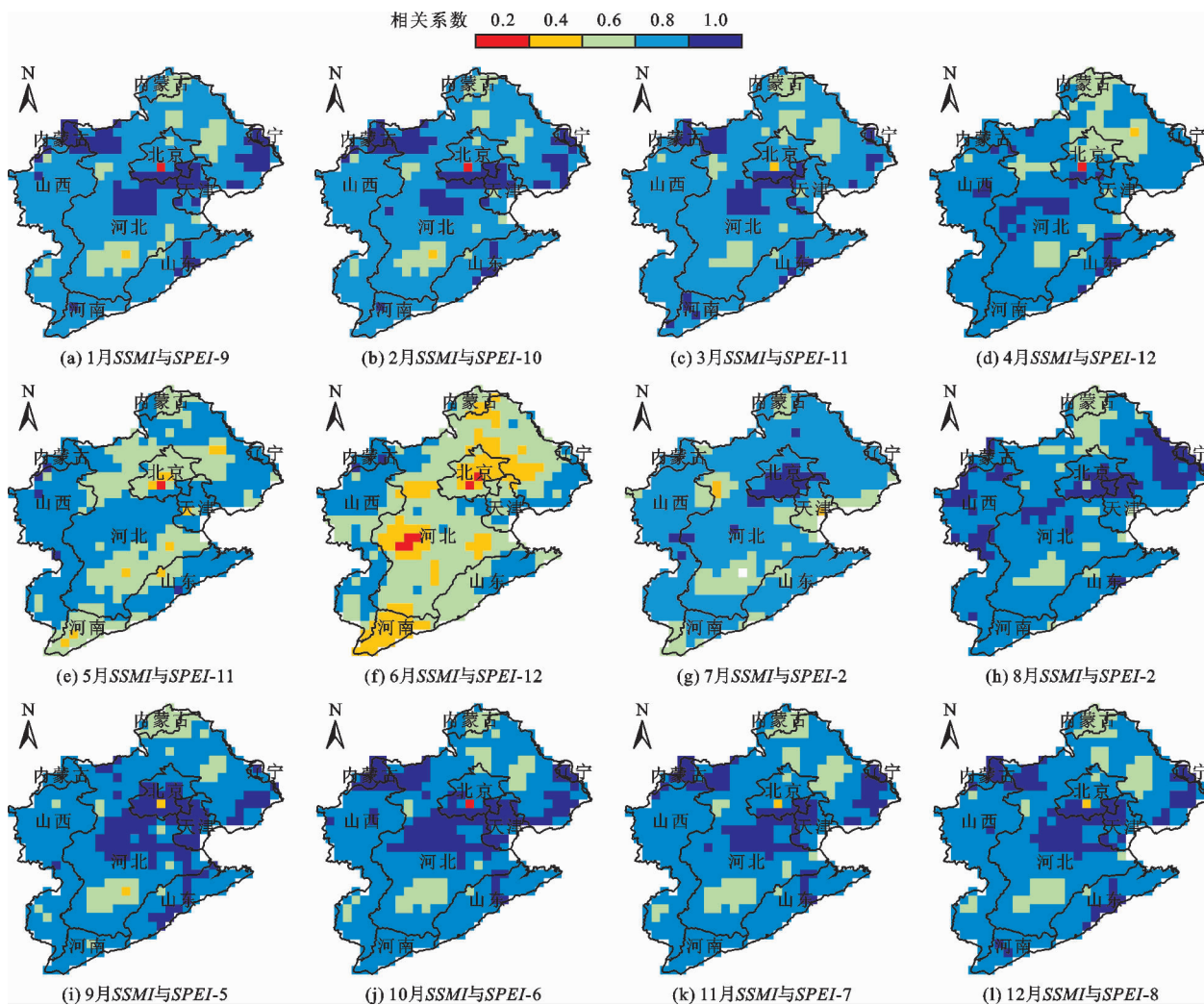


图7 海河流域各月份 SSMI 与多尺度 SPEI 的相关系数空间分布

## 4 讨论

海河流域作为我国重要的农业生产区,耕地为主要土地利用类型。随着气候变化和人类活动的双重干预,流域降水量逐年减少,水资源匮乏,干旱频发已成常态<sup>[26]</sup>。本文研究结果表明:春季和夏季为气象干旱高发季,此结果与范倩倩等<sup>[27]</sup>在研究干旱特征时空变化的过程中发现的规律相符;易发生农业干旱的季节集中在冬季和春季,造成该结果的原因可能是由于较少的降水量难以满足植被正常的生长需求<sup>[28]</sup>。在不同类型干旱变化趋势方面,该流域气象干旱表现出轻微加重趋势,仅有流域北部和西部部分地区呈缓解态势,此结果与王卫光等<sup>[26]</sup>的研

究结果类似;该流域农业干旱呈轻微缓解趋势,呈“北增南减”的分布格局,主要是由植被类型以及降水量的双重作用所致,与何龙等<sup>[29]</sup>在研究海河流域时空变化过程中发现的变化趋势具有一致性。

在气象干旱与农业干旱的传播特征方面,其传播时间随季节不同存在明显差异。由于春季风速较大,降水较少,气候较为干燥,因而传播时间较长;夏季传播时间较短,主要是由于降水较多。本文研究发现的规律性以及干旱传播的季节性差异与王飞<sup>[30]</sup>和 Huang 等<sup>[31]</sup>的研究结果类似。在传播特征上,本文的分析结果与 Yao 等<sup>[32]</sup>和李明等<sup>[23]</sup>的研究结论存在差异性,造成此差异的原因可能是本文所采用的干旱表征指数与其不一致。



本文仅研究了不同季节对干旱传播时间的影响,未对干旱传播时间影响的具体因素(如下垫面、大气环流因子、人类活动等)以及其他干旱传播特征(如干旱传递有效程度、敏感程度等)进行详细探讨,且在利用干旱指数代表干旱的过程中可能存在局限性。在未来的研究过程中,需要建立更加符合实际干旱情况的干旱指数来表征干旱,并结合海河流域地势、人类活动等具体影响因素进行深入研究。

## 5 结 论

利用多时间尺度的 *SPEI* 和月尺度的 *SSMI* 来代表气象干旱和农业干旱,本文采用多种统计分析方法对不同时间尺度下海河流域气象干旱和农业干旱的变化趋势、频率分布以及传播特征进行了分析,得出以下结论:

(1) 海河流域干旱发生频率具有明显的季节性和空间异质性。春季和夏季是气象干旱高发季,冬季和春季是农业干旱高发季,干旱高发区分别集中在流域中部和北部。

(2) 在演变趋势方面,海河流域超过 80% 的地区的 *SPEI* 值呈减小趋势。春季 *SPEI* 值减小趋势最为显著,气象干旱状态呈严重化趋势,而夏季、秋季和冬季的气象干旱状态呈缓解趋势。农业干旱呈“北部缓解,南部加重”的分布格局。其中,秋季 *SSMI* 值减小趋势最为显著。

(3) 气象干旱向农业干旱的传播时间存在季节性差异。春季、夏季、秋季和冬季的干旱传播时间依次为 11、5、6 和 9 个月。空间上,秋季和冬季的相关系数较高,高值区集中在流域中部,春季和夏季的相关系数较低,低值区位于河北省和北京市境内。

## 参考文献:

- [1] XIAO Mingzhong, YU Zhongbo, ZHU Yuelong. Copula-based frequency analysis of drought with identified characteristics in space and time: A case study in Huai River basin, China [J]. Theoretical and Applied Climatology, 2019, 137(3-4): 2865-2875.
- [2] 李忆平,李耀辉. 气象干旱指数在中国的适应性研究进展[J]. 干旱气象, 2017, 35(5): 709-723.
- [3] 莫兴国,胡实,卢洪健,等. GCM 预测情景下中国 21 世纪干旱演变趋势分析[J]. 自然资源学报, 2018, 33(7): 1244-1256.
- [4] 邱海军,曹明明,郝俊卿,等. 1950-2010 年中国干旱灾情频率-规模关系分析[J]. 地理科学, 2013, 33(5): 576-580.
- [5] 李倩,王瑛,许映军,等. 基于 Copula 的近 60 a 京津冀地区干旱灾害危险性评估[J]. 干旱区地理, 2019, 42(6): 1310-1321.
- [6] DAI Aiguo. Increasing drought under global warming in observations and models[J]. Nature Climate Change, 2013, 3(1): 52-58.
- [7] LIU Xianfeng, ZHU Xiufang, PAN Yaozhong, et al. Agricultural drought monitoring: Progress, challenges, and prospects[J]. Journal of Geographical Sciences, 2016, 26(6): 750-767.
- [8] HEIM R R. A review of twentieth-century drought indices used in the United States[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 2002, 83(8): 1149-1166.
- [9] WANG Qianfeng, ZENG Jingyu, QI Junyu, et al. A multi-scale daily *SPEI* dataset for drought characterization at observation stations over mainland China from 1961 to 2018[J]. Earth System Science Data, 2021, 13(2): 331-341.
- [10] 史晓亮,吴梦月,丁皓. *SPEI* 和植被遥感信息监测西南地区干旱差异分析[J]. 农业机械学报, 2020, 51(12): 184-192.
- [11] 周洪奎,武建军,李小涵,等. 基于同化数据的标准化土壤湿度指数监测农业干旱的适宜性研究[J]. 生态学报, 2019, 39(6): 2191-2202.
- [12] DING Yiho, XU Jiutun, WANG Xiaowen, et al. Propagation of meteorological to hydrological drought for different climate regions in China[J]. Journal of Environmental Management, 2021, 283: 111980.
- [13] HUANG Shengzhi, LI Pei, HUANG Qiang, et al. The propagation from meteorological to hydrological drought and its potential influence factors[J]. Journal of Hydrology, 2017, 547: 184-195.
- [14] LI Ronghui, CHEN Nengcheng, ZHANG Xiang, et al. Quantitative analysis of agricultural drought propagation process in the Yangtze River Basin by using cross wavelet analysis and spatial autocorrelation[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2020, 280: 107809.
- [15] LI Yaohui, YUAN Xing, ZHANG Hongsheng, et al. Mechanisms and early warning of drought disasters: Experimental drought meteorology research over China[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 2019, 100(4): 673-687.
- [16] BAI Peng, LIU Xiaomang, YANG Tiantian, et al. Evaluation of streamflow simulation results of land surface models in GLDAS on the Tibetan plateau[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2016, 121(20): 180-197.
- [17] VICENTE-SERRANO S M, BEGUERÍA S, LÓPEZ-MORENO J. A multiscalar drought index sensitive to global warming: The standardized precipitation evapotranspiration index [J]. Journal of Climate, 2010, 23



- (7): 1696–1718.
- [18] THORNTHWAITE C W. An approach toward a rational classification of climate[J]. Geographical Review, 1948, 38(1): 55–94.
- [19] SHI Benlin, ZHU Xinyu, HU Yunchuan, et al. Drought characteristics of Henan province in 1961–2013 based on standardized precipitation evapotranspiration index [J]. Journal of Geographical Sciences, 2017, 27(3): 311–325.
- [20] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 气象干旱等级: GB/T 20481—2006 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2006.
- [21] QIN Yue, YANG Dawen, LEI Huimin, et al. Comparative analysis of drought based on precipitation and soil moisture indices in Haihe basin of North China during the period of 1960–2010[J]. Journal of Hydrology, 2015, 526: 55–67.
- [22] MISHRA A K, INES A V M, DAS N N, et al. Anatomy of a local-scale drought: Application of assimilated remote sensing products, crop model, statistical methods to an agricultural drought study [J]. Journal of Hydrology, 2015, 526: 15–29.
- [23] 李明, 葛晨昊, 邓宇莹, 等. 黄土高原气象干旱和农业干旱特征及其相互关系研究[J]. 地理科学, 2020, 40(12): 2105–2114.
- [24] SEN P K. Estimates of the regression coefficient based on Kendall's tau[J]. Journal of the American Statistical Association, 1968, 63(324): 1379–1389.
- [25] KENDALL M G, GIBBONS J D. Rank correlation methods[M]. 5th ed. New York: Oxford University Press, 1990.
- [26] 王卫光, 黄茵, 邢万秋, 等. 基于 SPEI 的海河流域干旱时空演变特征及环流成因分析[J]. 水资源保护, 2020, 36(3): 8–13.
- [27] 范倩倩, 赵安周, 张安兵, 等. 1965–2015 年海河流域干旱时空变化特征分析[J]. 农业现代化研究, 2019, 40(3): 507–517.
- [28] 范倩倩. 海河流域植被覆盖时空演变及其对多时间尺度干旱响应[D]. 邯郸: 河北工程大学, 2020.
- [29] 何龙, 曾晓明, 钱达, 等. 海河流域近 17 年植被时空变化及其气候影响因素[J]. 天津师范大学学报(自然科学版), 2020, 40(3): 54–61+68.
- [30] 王飞. 多干旱类型视角下的黄河流域干旱时空演变特征研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2020.
- [31] HUANG Shengzhi, HUANG Qiang, CHANG Jianxia, et al. The response of agricultural drought to meteorological drought and the influencing factors: A case study in the Wei River Basin, China[J]. Agricultural Water Management, 2015, 159: 45–54.
- [32] YAO Ning, ZHAO Huichao, LI Yi, et al. National-scale variation and propagation characteristics of meteorological, agricultural, and hydrological droughts in China[J]. Remote Sensing, 2020, 12(20): 3407.

