

DOI:10.13476/j.cnki.nsbdkj.2021.0074

曹永强,王菲.河北省植被时空变化及其对气象干旱的响应[J].南水北调与水利科技(中英文),2021,19(4):708-719,757.  
CAO Y Q,WANG F. Spatial and temporal variation of vegetation and its response to meteorological drought in Hebei Province [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology,2021,19(4):708-719,757. (in Chinese)

# 河北省植被时空变化及其对气象干旱的响应

曹永强,王菲

(辽宁师范大学地理科学学院,辽宁 大连 116029)

**摘要:**基于连续时间序列的 SPOT/VEGETATION NDVI 卫星遥感数据和气象数据,利用 Penman-Monteith、反距离加权插值、相关分析等方法,以河北省为研究对象,深入探讨植被动态特征及气象干旱影响。结果显示:河北省多年平均归一化植被指数(NDVI)在时间尺度上呈波动上升趋势,尤其在 2003 年开始出现 0.028/(10 a)的飞跃增长,空间尺度上呈现中部高两侧低的分布特点;河北省气温上升趋势显著,空间分布呈西北—东南增加趋势,降水量从西北部—中部—东北部呈现低—中—高的分布格局;春季发生干旱的面积及频率皆为最高,夏季干旱高频地区位于唐山、张家口地区,秋季干旱频率最低,冬季以轻旱为主;植被 NDVI 与标准化降水蒸散指数(SPEI)相关性夏季最强(0.529),春秋季次之,冬季相对较弱;年尺度上,以蔚县站、张北站和承德站为中心区域主要为显著负相关,显著正相关主要分布于中部地区。研究结果可为生态系统管理部门制定科学合理的植被建设决策提供参考依据。

**关键词:**NDVI;植被覆盖;气象干旱;响应分析;河北省

中图分类号:S271 文献标志码:A 开放科学(资源服务)标志码(OSID):



植被是覆盖地表的植被群落的总称,作为陆地生态系统的重要组成部分,其沟通了大气圈、水圈和土壤圈<sup>[1]</sup>,是区域气候特征的反映和指示。目前,监测植被发展动态变化已成为生态学和地理学研究的热点领域。归一化植被指数(NDVI)<sup>[2]</sup>是学术界公认的最为有效的表征植被生长态势的指标之一,它能有效反映出植被冠层的背景影响,如土壤、潮湿地面、粗糙度等,尤其对气象灾害反应最为敏感。此外,随着三北防护林建设以及退耕还林还草等工程的推进,植被生长越来越受到人类经济活动的影响。因此,在全球变暖、极端气候频率加快及人类活动强度增加的背景下,综合探究植被生长的变化特征及归因分析,具有重要的现实意义。

近年来,国内外借助遥感技术探究植被覆盖变化影响因素的研究已取得一定进展。Nanzad 等<sup>[3]</sup>研究发现,蒙古国生长季内 NDVI 异常与降水、温度两个指标有关,其中主要影响因素为降水异常

( $P < 0.005$ );土壤作为植被生长的直接营养提供者,其养分状况的变动同样影响植被的生长,Piedal-lu 等<sup>[4]</sup>发现在地中海地区,夏季的土壤水分储备以及低温促进了植被动态变化;此外,不同植被类型对干旱的响应程度亦有所差别,Jha 等<sup>[5]</sup>在对印度的研究中发现农田最容易受到干旱影响。国内方面,研究气象干旱的指标较多,主要有降水距平百分率、降水 Z 指数、作物水分亏缺指数、相对湿度指数、综合气象干旱指数等<sup>[6-8]</sup>。张更喜等<sup>[9]</sup>采用 scPDSI 指数对干旱与中国各区域植被的响应关系进行探究,结果表明在青藏高原地区 NDVI 与干旱的相关性最大;胡君德等<sup>[10]</sup>借助标准偏差分析和相关性分析探讨气候变化对鄂尔多斯高原植被动态的影响发现,秋季的 NDVI 更多受到夏季干旱的影响,而秋季降水量的增加有助于典型草原 NDVI 值的提升。

河北省作为京津的天然生态屏障,截至 2018 年

收稿日期:2020-09-06 修回日期:2020-11-26 网络出版时间:2021-04-07

网络出版地址:https://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1430.TV.20210406.1729.002.html

基金项目:国家自然科学基金(52079060;51779114);2020 年辽宁省重点研发计划(2020JH2/10200043)

作者简介:曹永强(1972—),男,内蒙古乌盟丰镇人,教授,博士生导师,主要从事水文水资源研究。E-mail:caoyongqiang@lnnu.edu.cn

底,森林覆盖率达 34%<sup>[11]</sup>,同时全力推进国土绿化三年行动,2019 年完成营造林 68.4 万 hm<sup>2</sup>,约占全国造林数的 1/10<sup>[12]</sup>。河北省半湿润半干旱的大陆性季风气候以及农牧交错带的地理位置决定了其生态环境自我调节能力有限,极易受到气象灾害尤其是干旱的影响<sup>[13]</sup>。鉴于以往研究局限于植被覆盖的时空变化或单一气象因子对植被覆盖变化的影响探讨,而在河北省地区将气候变化与气象干旱综合考虑的研究则相对较少,故此,在已有研究的基础上,详细分析河北省植被覆盖的变化趋势,进而探讨影响其变化的气象干旱,以期为生态系统管理部门制定科学合理的植被建设决策提供参考依据。

## 1 数据来源及研究方法

### 1.1 研究区概况与数据来源

河北省位于我国华北平原中北部,地处 113°27'E~119°50'E,36°05'N~42°40'N。东临渤海,北靠燕山,西倚太行山,总面积 18.85 万 km<sup>2</sup>,地势由西北向东南倾斜,属温带大陆性季风气候,雨热同期,多年平均气温-1.5~15.2℃,年无霜期 81~204 d,年均降水量 503.49 mm,年日照时数 2 303.1 h。由于其独特的海陆位置及季风气候,河北省深受旱涝灾害的影响,同时根据中国 1:100 万植被类型空间分布数据,河北省中南部的广大地区主要植被类型为耕地,林地及草地主要分布于北部山地地区,全省森林面积 641.2 万 hm<sup>2</sup><sup>[11]</sup>,植被对气候变化反应极为敏感。

本文所需归一化植被指数(NDVI)数据来源于中国科学院资源环境科学数据中心(<http://www.resdc.cn/>)。河北省 NDVI 数据集基于连续时间序列的 SPOT/VEGETATION NDVI 卫星遥感数据,采用最大值合成法生成,并利用 ArcGIS 软件中的均值法获取逐年平均 NDVI 值。逐日平均气温和降水数据来源于中国气象数据网(<http://data.cma.cn/>),时间尺度为 2000—2018 年。为保证空间插值精度,在选取 18 个省内站点的同时,增加大同、五台山、安阳、北京和天津等 5 个省外站点,共计 23 个站点。河北省土地利用及监测站点分布见图 1。

### 1.2 研究方法

#### (1) SPEI 干旱指标

影响植被 NDVI 变化的气象因子众多,本文借助 SPEI(标准化降水蒸散指数)探究河北省的干旱情况及其对植被 NDVI 的影响。该指数不仅考虑

了降水与蒸散,而且保留了 SPI(标准化降水指数)、PDSI(帕默尔干旱指数)等对温度降水的敏感度又具备 SPI 适合多尺度、多空间比较的优点,可更为客观地描述干旱<sup>[14]</sup>。

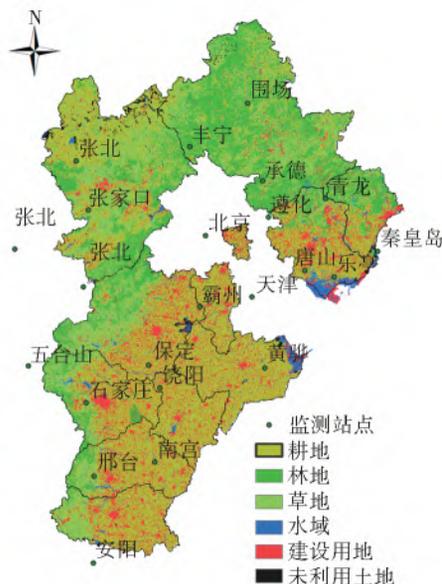


图 1 河北省土地利用及监测站点分布

Fig. 1 Distribution of land use and monitoring stations in Hebei Province

第一步:计算潜在蒸散量,采用 FAO 推荐的 Penman-Monteith 方法

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} U_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34U_2)} \quad (1)$$

式中: $ET_0$  代表站点潜在蒸散量,mm; $G$  为土壤热通量, $MJ/(m^2 \cdot d^{-1})$ ,一般认为夜间是  $R_n$  的 0.5 倍,白天是  $R_n$  的 0.1 倍; $T$  为日平均温度,℃; $U_2$  为 2 m 高处风速,m/s,可通过测量获得。

$\gamma$  为湿度计常数,kPa/℃,计算公式为

$$\gamma = 0.665 \times 10^{-3} \times 101.3 \times \frac{293 - 0.0065z}{293} \quad (2)$$

其中, $z$  为海拔高度。

$e_s$  为饱和水汽压,kPa,是一个与温度相关的参数,计算公式为

$$e_s = e^0 T_{hr} = 0.6108 \exp \frac{17.27 T_{hr}}{T_{hr} + 237.3} \quad (3)$$

$e_a$  为实际水汽压,kPa/℃,在已知空气湿度的情况下,可由下式计算获得:

$$e_a = e^0 T_{hr} \frac{RH_{mean}}{100} \quad (4)$$

其中, $RH_{mean}$  为平均空气湿度。

$\Delta$  为饱和水汽压-温度关系曲线的梯度,kPa/℃,公式为

$$\Delta = \frac{4\ 098 \times e_s}{T_{hr} + 237.3^2} \quad (5)$$

其中,  $R_n$  为地面净辐射量,  $\text{MJ}/\text{m}^2$ , 计算公式为

$$R_n = R_{ns} - R_{nl}$$

$$R_{ns} = (1 - \alpha)R_s$$

$$R_{nl} = \sigma \frac{T_{hr}^4}{2} (0.34 - 0.14\bar{e}_a) \times 1.35 \times$$

$$\frac{R_s}{(0.75 + 2 \times 10^{-5})R_a} - 0.35$$

$$R_a = \frac{12(60)}{\pi} G_{sc} d_r [\bar{\omega}_2 - \bar{\omega}_1 \sin \vartheta \sin \delta +$$

$$\cos \vartheta \cos \delta (\sin(\bar{\omega}_2) - \sin(\bar{\omega}_1))] \quad (6)$$

式中:  $R_{ns}$  为净太阳辐射;  $R_{nl}$  为净长波;  $R_a$  为宇宙辐射;  $G_{sc}$  为太阳系数 0.082 0;  $d_r$  为太阳到地球的距离,  $\text{m}$ ;  $\bar{\omega}_1$  太阳起始入射角;  $\bar{\omega}_2$  太阳最终入射角<sup>[15]</sup>。

第二步: 计算逐月降水量与潜在蒸散量的差值

$$D_i = P_i - ET_{0i} \quad (7)$$

式中:  $P_i$  为第  $i$  月的降水量,  $\text{m}$ ;  $ET_{0i}$  为第  $i$  月的潜在蒸散量,  $\text{mm}$ ;  $D_i$  为第  $i$  月的水分盈亏状况,  $\text{mm}$ 。

第三步: 对降水量和潜在蒸散量的差值正态化处理, 采用 log-logistic 概率分布函数, 并对概率密度进行标准化处理, 计算出对应的 SPEI:

$$F(x) = \left[ 1 + \left( \frac{\alpha}{x - \gamma} \right)^\beta \right]^{-1} \quad (8)$$

式中参数  $\alpha, \beta, \gamma$  的计算如下:

$$\alpha = \frac{(\bar{\omega}_0 - 2\bar{\omega}_1)^\beta}{\Gamma(1 + 1/\beta)\Gamma(1 - 1/\beta)} \quad (9)$$

$$\beta = \frac{2\bar{\omega}_1 - \bar{\omega}_0}{6\bar{\omega}_1 - \bar{\omega}_0 - 6\bar{\omega}_2} \quad (10)$$

$$\gamma = \bar{\omega}_0 - \alpha\Gamma(1 + 1/\beta)\Gamma(1 - 1/\beta) \quad (11)$$

式中:  $\Gamma$  为阶乘函数;  $\bar{\omega}_0, \bar{\omega}_1, \bar{\omega}_2$  为数据序列  $D_i$  的概率加权矩阵:

$$\bar{\omega}_s = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (1 - F_i)^s D_i \quad (12)$$

$$F_i = \frac{i - 0.35}{N} \quad (13)$$

式中:  $s$  分别取 0, 1, 2;  $N$  为参与计算的月份个数, 即  $D_i$  的个数。最后对累计概率密度进行标准化:

$$P = 1 - F(D_i) \quad (14)$$

当累积概率  $P \leq 0.5$  时

$$\bar{\omega} = \sqrt{-2 \ln(P)} \quad (15)$$

$$\delta_{\text{SPEI}} = \bar{\omega} - \frac{C_0 + C_1\bar{\omega} + C_2\bar{\omega}^2}{1 + d_1\bar{\omega} + d_2\bar{\omega}^2 + d_3\bar{\omega}^3} \quad (16)$$

当累积概率  $P > 0.5$  时

$$\delta_{\text{SPEI}} = - \left( \bar{\omega} - \frac{C_0 + C_1\bar{\omega} + C_2\bar{\omega}^2}{1 + d_1\bar{\omega} + d_2\bar{\omega}^2 + d_3\bar{\omega}^3} \right) \quad (17)$$

式中:  $P$  表示概率分布函数中大于  $D_i$  部分的概率;  $C_0 = 2.515\ 517, C_1 = 0.802\ 853, C_2 = 0.010\ 328, d_1 = 1.432\ 788, d_2 = 0.189\ 269, d_3 = 0.001\ 308$ 。

分别计算月尺度(SPEI-1)、季尺度(SPEI-3)和年尺度(SPEI-12)的 SPEI 值。季节划分: 春季(3—5 月)、夏季(6—8 月)、秋季(9—11 月)、冬季(12—翌年 2 月)。春、夏、秋、冬季分别采用的是 3 个月尺度中 5 月、8 月、11 月和次年 2 月表示<sup>[16]</sup>。参考气象干旱等级规范<sup>[17]</sup>划分 SPEI 值见表 1。

表 1 SPEI 指数值的干旱等级分类  
Tab. 1 SPEI index values for classification of drought grades

$\delta_{\text{SPEI}}$	$\delta_{\text{SPEI}} \leq -2.0$	$-2.0 < \delta_{\text{SPEI}} \leq -1.5$	$-1.5 < \delta_{\text{SPEI}} \leq -1.0$	$-1.0 < \delta_{\text{SPEI}} \leq -0.5$	$-0.5 < \delta_{\text{SPEI}}$
干旱等级	特旱	重旱	中旱	轻旱	无旱

### (2) 干旱频率

统计河北省 23 个监测站点 2000—2018 年 3 个月尺度的 SPEI 值  $\leq -0.5$  的出现次数  $n$ , 占总年份 ( $N=19$ ) 的比重, 从而计算各站点干旱发生的频率<sup>[18]</sup>:

$$D = \frac{n}{N} \times 100\% \quad (18)$$

### (3) 相关性分析

利用 ArcGIS 中的反距离加权插值法 (inverse distance weighted), 插值得到 SPEI 栅格图结合

NDVI 影像, 计算出 NDVI 与 SPEI 的空间相关分布图, 并进行显著性检验, 用以分析 NDVI 与干旱指数空间关系<sup>[19]</sup>。

$$R_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (19)$$

式中:  $R_{xy}$  为相关系数;  $x_i, y_i$  分别为第  $i$  年的 NDVI 和 SPEI;  $\bar{x}, \bar{y}$  分别为变量  $x, y$  的多年平均值, 通过相关系数检验表可知, 当  $n=19$  时,  $R_{xy}$  的相关性等级划分见表 2。

表 2 相关性等级划分  
Tab. 2 Correlation ratings

极显著负相关	显著负相关	不显著负相关	不显著正相关	显著正相关	极显著正相关
$(-1, -0.575]$	$(-0.575, -0.456]$	$(-0.456, 0]$	$(0, 0.456]$	$(0.456, 0.575]$	$(0.575, 1)$

## 2 结果分析

### 2.1 植被覆盖演变分析

#### 2.1.1 NDVI 时间变化趋势分析

2000—2018年河北省年均植被覆盖指数 NDVI 变化趋势见图 2。由图 2 可知,河北省多年平均 NDVI 值整体呈波动上升趋势,表明河北省植被状况得到不断改善。上升趋势主要可以分为两个阶段:第一阶段为 2000—2002 年低水平小幅度波动以 0.015/(10 a)的速度上升,2000 年为近 18 年的最低值(0.674);第二阶段为高水平大幅度波动,自 2003 年开始 NDVI 指数出现飞跃增长,此后呈现持续波动状态,变化速度为 0.028/(10 a),2018 年达到最高值 0.768。主要由于 2000 年来北方的又一次大旱,植被受灾严重,2003 年降水量的增加确保了植被的良好长势,植被覆盖反弹较为明显<sup>[20]</sup>。近 19 年,NDVI 指数达到平均水平以上的年份占比 61.2%,平均值 0.734,高于京津冀整体研究区(0.52)<sup>[21]</sup>,甚至是全国多年平均 NDVI 指数的 2 倍<sup>[22]</sup>,主要是由于河北省长城以南的广大地区冬小麦的种植,冬季河北省植被覆盖率相对较高。

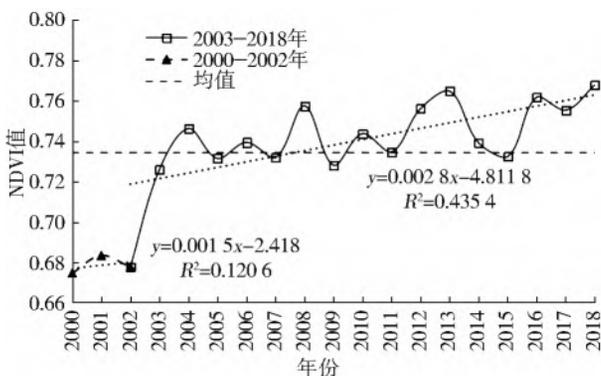


图 2 2000—2018 年河北省 NDVI 时序变化趋势

Fig. 2 Trend of NDVI temporal change in Hebei Province from 2000 to 2018

#### 2.1.2 NDVI 空间演变分析

为进一步探究河北省植被覆盖的空间分布差

异,绘制图 3,并借鉴已有研究成果<sup>[15]</sup>将 NDVI 指数进行分级,统计栅格尺度中不同等级 NDVI 像元数见表 3。河北省春季 NDVI 多年平均值为 0~0.85,主要集中在 0.20~0.60,占比 68.76%。0~0.20 的植被低覆盖区域零星分布在张家口南部的蔚县、阳泉县、唐山南部沿海、沧州黄骅沿海地区;0.80~0.85 的植被覆盖高值区主要分布在承德市。夏季植被 NDVI 多年平均值较高,主要表现在大于 0.60 的像元数占总像元数的 90.07%,最大值达 0.89,全省整体植被 NDVI 指数较高,且分布较均匀。秋季多年平均值为 0~0.86,最大值仅小于夏季,但像元数主要集中在 0.40~0.80,远小于夏季 NDVI 值。冬季植被覆盖指数与春、夏、秋季相比,NDVI 值在大于 0.60 的等级没有分布,在 0~0.58 波动,主要集中在 0.20~0.40,说明在冬季河北省植被覆盖率较低,但大于 0,主要是由于河北省为暖温带季风气候,除太行山、张北高原以及沿海地区外,广大平原区在冬季仍有冬小麦覆盖<sup>[23]</sup>。

河北省年均 NDVI 指数呈现中部高两侧低的分布特点,空间差异明显。其中:在沧州市的黄骅,唐山市的滦南、唐海,张家口张北高原、石家庄太行山脉,NDVI 指数较小,植被覆盖率较低,原因为高山高原地区,主要受到温度和降水条件的限制,植被主要以灌木及草甸为主。在海拔 3 000 m 以上则以裸露岩石为主<sup>[13]</sup>,植被覆盖率极低。此外,冬季该地无农作物种植,拉低全省植被覆盖水平;黄骅市和唐山市沿海地带土壤主要分布为滨海盐土,具有“盐碱地分布广、土壤盐分高、植被覆盖率低”的特点<sup>[24]</sup>。

### 2.2 气温和降水量演变分析

将河北省 23 个监测站点 2000—2018 年逐日平均气温、降水量平均化处理,得到逐年平均气温、降水量变化趋势图(图 4(a)、5(a)),并利用 ArcGIS 中的反距离加权插值法对 23 个站点进行插值处理得到年均气温、降水量空间分布(图 4(b)、5(b))。以此探究河北省近 20 年气温和降水量变化趋势。

表 3 2000—2018 年河北省不同等级植被 NDVI 像元比例

Tab. 3 NDVI pixel scale of different grades of vegetation in Hebei Province from 2000 to 2018

NDVI 等级	春季		夏季		秋季		冬季		年均	
	像元数	比例/%	像元数	比例/%	像元数	比例/%	像元数	比例/%	像元数	比例/%
$0 < \delta_{NDVI} \leq 0.20$	4 617	2.47	1 010	0.54	1 090	0.58	64 636	34.63	997	0.53
$0.20 < \delta_{NDVI} \leq 0.40$	61 400	32.89	1 144	0.61	3 873	2.07	119 600	64.08	1 092	0.59
$0.40 < \delta_{NDVI} \leq 0.60$	66 952	35.87	16 390	8.78	37 650	20.17	2 418	1.29	16 052	8.60
$0.60 < \delta_{NDVI} \leq 0.80$	51 672	27.68	122 064	65.40	138 216	74.05	0	0	118 660	63.57
$\delta_{NDVI} > 0.80$	2 014	1.08	46 047	24.67	5 826	3.12	0	0	49 829	26.70

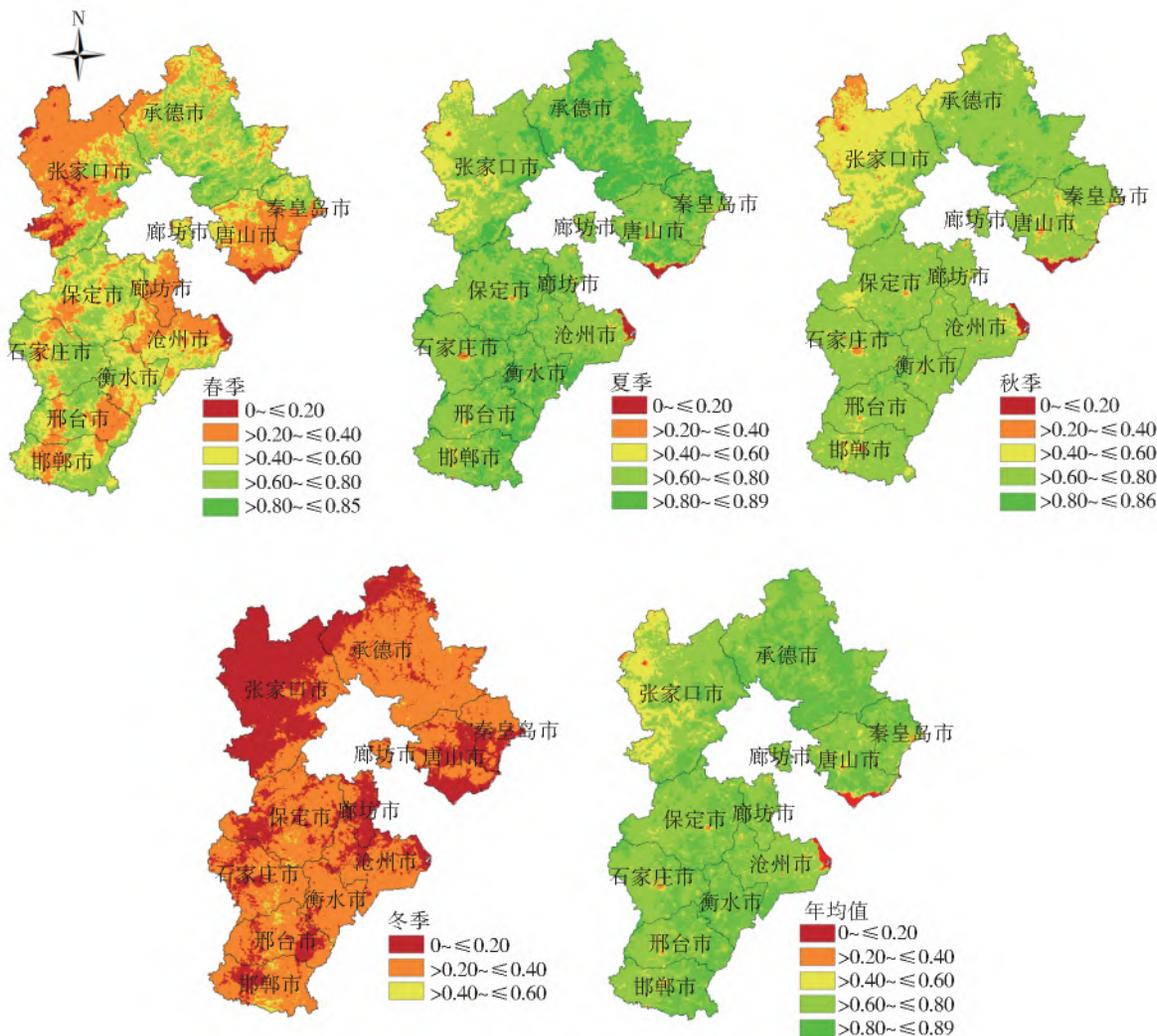


图 3 2000—2018 年河北省季节、年均 NDVI 空间展布

Fig. 3 Seasons and annual average NDVI spatial distribution in Hebei Province from 2000 to 2018

### 2.2.1 气温时空演变分析

由图 4(a)时间变化趋势分析可知,河北省年均气温在 2000—2018 年总体呈上升趋势( $0.36\text{ }^{\circ}\text{C}/(10\text{ a})$ ),通过了 0.05 显著性检验,远高于全国年平均气温  $0.25\text{ }^{\circ}\text{C}/(10\text{ a})$  的上升幅度<sup>[25]</sup>。尤其 2017 年升温明显为历史最高,根据统计数据,2017 年四季气温均偏高,春季尤为明显。春季气温的升高,加之降水的减少,易造成春末夏初阶段性气象干旱的产生。同时根据《河北省 2107 年度气象公报》<sup>[26]</sup>,该年高温日数显著增多,高温天气出现早,过程频发,持续时间长,影响范围大。结合图 4(b)年平均气温空间展布分析可知,河北省年均温主要呈现西北低东南高的分布格局。总体看来:北部山地海拔较高,年均温较低,且夏季主要受亚洲高纬环流形势影响,冷空气控制下夏季凉爽,气温升幅较小;中南部的河北平原地势平坦,同时夏季受河套平原的干暖气团控制,夏季气温持续高温。故此,南部年均气温远高于北部。

### 2.2.2 降水量时空演变分析

图 5 为 2000—2018 年河北省年降水量时空分布。由图 5(a)年降水量时间变化可知:研究时段内,河北省总体降水量以  $35.901\text{ mm}/(10\text{ a})$  的速度上升,虽呈增加趋势,但未通过 0.05 显著性检验,说明研究年段河北省降水量非常不稳定;多年平均降水量  $503.49\text{ mm}$ ,负距平年有 11 年,占全部研究年份的 57.9%,2003—2004 年、2008 年、2010—2012 年、2016 年以及 2018 年为正距平年,尤其在 2012 年和 2016 年出现显著变化,降水量急剧增加,这主要是由于夏秋季节发生严重暴雨,2016 年的“7·19”特大暴雨洪涝灾害对河北省西部太行山区造成重大损失,暴雨强度大,持续时间长。结合年降水量空间分布(图 5(b)),河北省年降水量高值区主要集中在承德东南部、唐山、秦皇岛等地,其次为燕山和太行山迎风坡一侧,受地形影响易形成局部地形雨,超过  $600\text{ mm}$ ,低值区主要位于张家口西北部以及石家庄和保定市中南部,不足  $450\text{ mm}$ 。

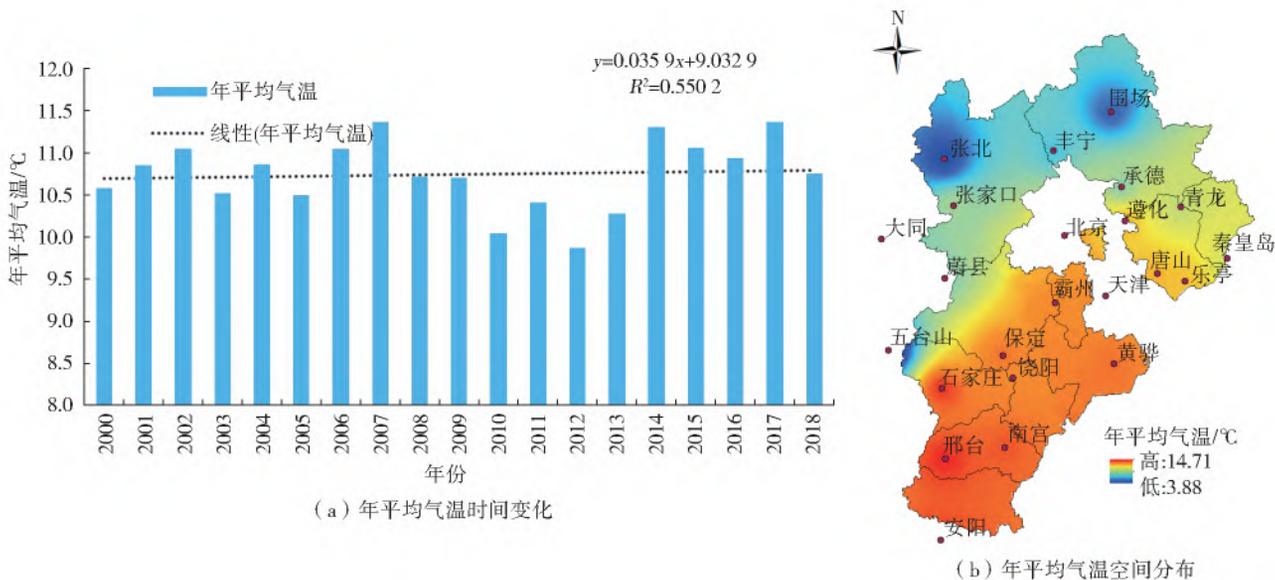


图4 2000—2018年河北省年平均气温时空分布

Fig. 4 Spatial and temporal distribution of annual average temperature in Hebei Province from 2000 to 2018

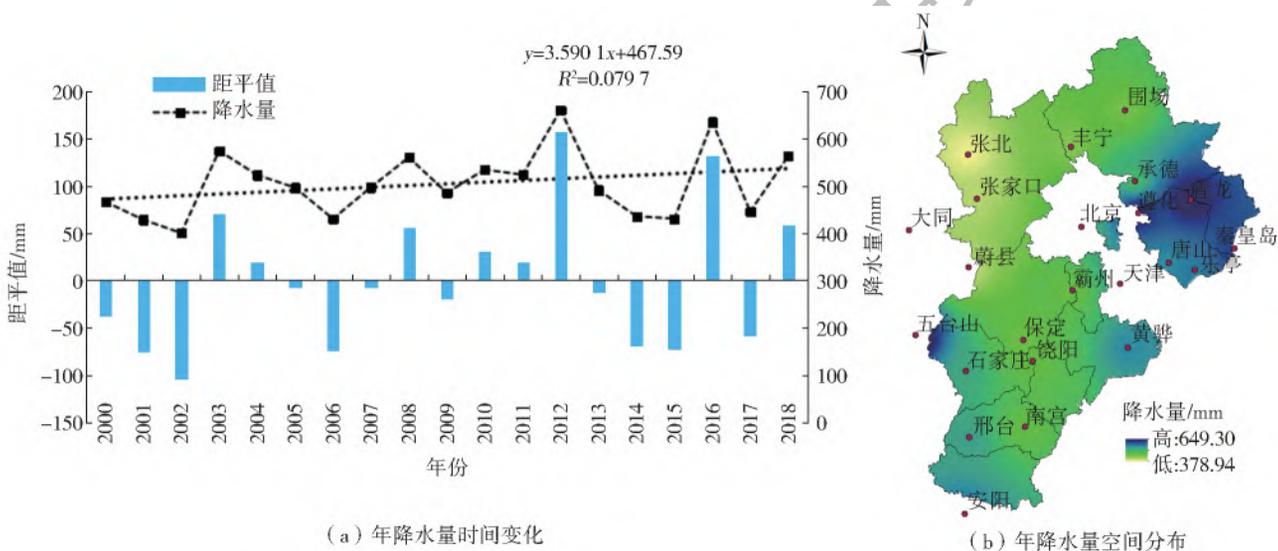


图5 2000—2018年河北省年降水量时空分布

Fig. 5 Spatial and temporal distribution of annual precipitation in Hebei Province from 2000 to 2018

## 2.3 气象干旱演变分析

### 2.3.1 干旱时间变化趋势分析

基于研究区 23 个监测站点气温和降水数据,计算得到月、季、年多尺度 SPEI 值,23 个站点取其平均绘制图 6,以此探究河北省近 19 年来的干旱变化特征。一般来说时间尺度越短,SPEI 对气温和降水的响应越强烈震荡、变化越快、用时越短,意味着干旱发生的频率越高,持续时间越短<sup>[27]</sup>,见图 6(a)。总体上河北省 SPEI 变化幅度较大,为-2.3~2.8。具体来说,河北省 2000—2018 年 SPEI-1 表现为异常强烈的正负震荡(一年 1 个周期),反映了月降水对干旱程度的剧烈影响,其中 SPEI 为正值占比 58.77%,表示河北省在研究年段气候较为湿润;

SPEI-3 反映了河北省干湿季节变化规律,曲线变化较 SPEI-1 和缓,表现为 2 年 1.5 个周期的变化频率;SPEI-12 曲线变化最为平滑,体现了干旱的年变化规律,其中在 2017 年 SPEI 指数为最低值(-2.07),表示出现了特旱的发生。河北省气象局发布的《河北省 2017 年度气象公报》数据显示,2017 年全省干旱以阶段性为主,东北部旱情较重,出现重、特旱,但发生面积小于河北省的 1/4,而 SPEI 指数判断 2017 年为特旱年份,较《河北省 2017 年度气象公报》公布数据判断旱情严重。

由图 6(b)可知,河北省季节干旱变化明显,呈阶段性特征,干旱多发生在春季,夏冬季其次,秋季基本上无干旱发生。根据图 6(b)中 SPEI 季节变化并结合干旱等级分类可得,2013 年春季判断为轻旱

(-0.77),比《河北省 2017 年度气象公报》判断较轻;2014 年夏季判断为重旱(-1.53),与《河北省 2017 年度气象公报》高度吻合,为研究期内旱情最严重的年份;2015—2016 年春季分别为轻旱(-0.93)和重旱(-1.52),夏季为轻旱(-0.26、-0.16),与《河北省 2017 年度气象公报》基本符合;2017 年 SPEI 显示春旱最严重,为重旱(-1.86),秋

季则无干旱的发生(0.35),与《河北省 2017 年度气象公报》相比,旱情判断的较为严重;2018 年干旱主要发生在春季,为中旱(-1.1),冬季为无旱(-0.13),旱情判断较《河北省 2017 年度气象公报》轻。图 6 的分析结果与《河北省 2017 年度气象公报》数据基本吻合,个别数据存在微小偏差,说明以季节尺度 SPEI 值来分析河北省旱情较为合理。

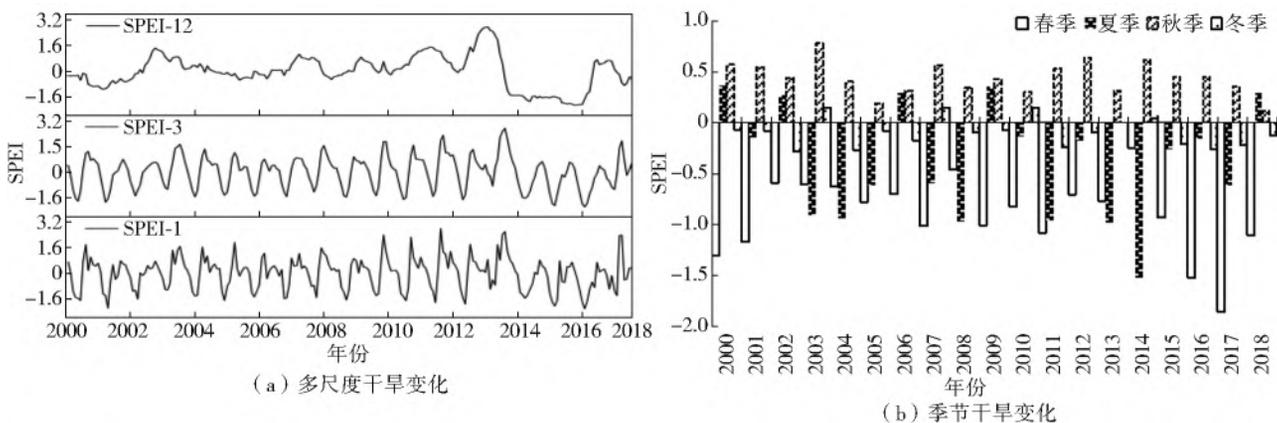


图 6 河北省干旱指数 SPEI 值变化趋势

Fig. 6 Variation trend of drought index SPEI in Hebei Province

### 2.3.2 干旱频率空间演变分析

根据 SPEI 指数分类等级,结合式(1)依次对 23 个站点的春、夏、秋、冬(SPEI-3)及年均总干旱频率(SPEI-12)进行统计,借助 ArcGIS 软件采用空间插值法得到河北省干旱频率空间分布,见图 7。由图 7 可见,河北省发生干旱的频率空间差异及强度差异明显。春季发生干旱的面积及频率皆为最高,其中干旱发生频率达 81% 以上的区域遍及河北省的北部及中部的大部分地区,仅在南部的邯郸和邢台西部频率低于 40%。在 2000—2018 年,河北省春季中旱发生的频率最高,其中以重旱为主的站点有蔚县、秦皇岛、南宫站,以轻旱为主的站点为丰宁、围场、遵化及青龙站,除此以外其他站点均以中旱为主。夏季发生干旱的频率为 0~45%,其中低于 35% 的干旱发生频率面积最广。夏季干旱发生的高频地区主要位于河北省北部,其中乐亭站在研究年段发生了特旱,张家口及蔚县站以重旱为主,其他各站以中旱或轻旱为主。秋季以丰宁、保定和饶阳站为中心发生了轻旱,其他地区均无干旱发生。冬季发生干旱高频地区以南宫站为中心向外辐射,发生强度以轻旱为主,无特旱及重旱的发生,发生中旱的站点主要有大同站、遵化站及霸州站。河北省年均干旱频率以 0~40% 为主,干旱高频地区主要发生在西北部张家口市

发生干旱的地区均以轻旱为主,南部的邢台站及安阳站几乎无旱灾发生。

## 3 NDVI 对气象干旱的响应分析

### 3.1 季节尺度响应

运用皮尔逊相关系数法绘制植被 NDVI 在不同季节与 SPEI-3 指数的相关性空间分布(图 8),年均季节相关性系数值见表 4。春季相关系数为 -0.75~0.23,年均 -0.487,通过了 0.05 显著性检验,以负相关为主。石家庄站、衡水站及其以南区域主要为不显著正相关,主要以耕地为主,耕地对 SPEI 响应较高<sup>[28]</sup>,故为正相关。农作物多种植冬小麦,春季由于气温造成的冻害、干热风等农业气象灾害发生较轻,较适宜冬小麦生长<sup>[29]</sup>,故以不显著为主。石家庄站、衡水站及其以北为负相关,其中以张家口、承德和天津站为中心向外辐射区域为极显著相关水平,以五台山站和围场站为中心区域为显著相关水平。夏季相关系数幅动范围为 -0.13~0.76,全省以正相关为主,极显著正相关区域以饶阳站为中心向外辐射,显著正相关覆盖河北省中南部以及唐山南部地区,负相关仅分布在五台山、安阳、围场和承德站附近。夏季多年年均相关系数为 0.529,达到显著水平,6—8 月为植被旺盛生长季节,尤其在河北省中南部地区,夏玉米生长期需水量巨大,极易受到干旱的影响。秋季相关系数为 -0.63~

0.40,全省以负相关为主,其中不显著负相关遍及全省,主要由于9月为夏玉米成熟期,夜间增温快,而玉米夜间呼吸增强,不利于营养物质的积累<sup>[30]</sup>;而该季节降水量充足,弥补了部分由于气温带来的负影响,故秋季不显著负相关覆盖较大面积。显著负相关以大同站为中心向外辐射到张家口等区域,极显著负相关分别以五台山站、张家口站、承德站为中心。正相关分布于河北省东北部的秦皇岛和唐山等

地,多年平均相关系数-0.247,达到显著水平。秋季植被开始枯黄、落叶,水分需求减少,对其影响降低<sup>[31]</sup>。冬季相关系数变化范围相较于春、夏、秋季幅动较小,相关性最低(0.121),全省主要以不显著正相关为主,显著正相关零星分布于秦皇岛等地。综合表4可知,NDVI与SPEI相关系数季节变化明显,表明河北省植被对季节性降水与土壤水分变化较为敏感。

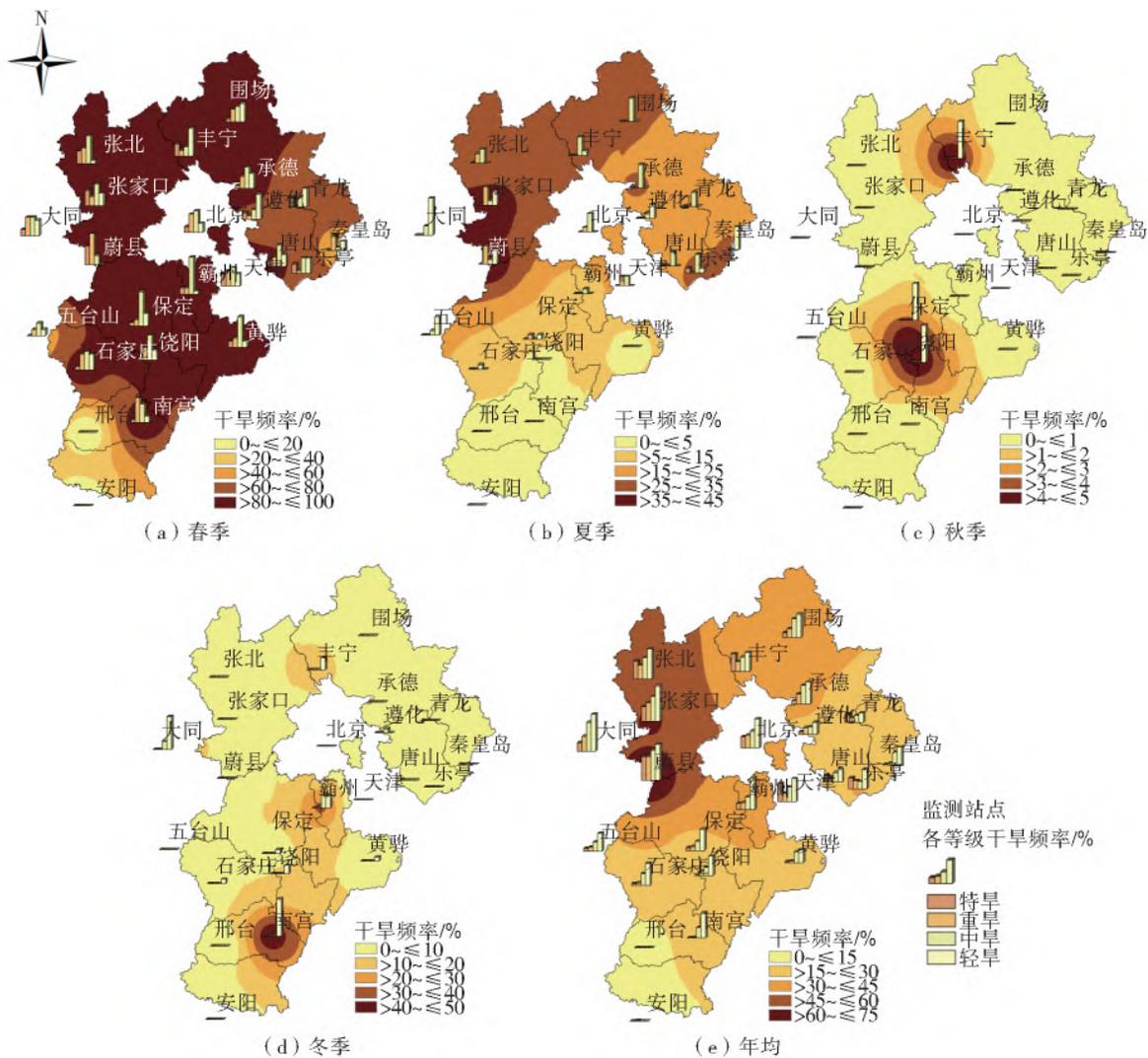


图7 河北省季节及年均干旱频率空间分布

Fig. 7 Spatial distribution of seasonal and annual average drought frequency in Hebei Province

表4 河北省季节NDVI与SPEI的相关系数

Tab. 4 Correlation coefficient between seasonal NDVI and SPEI in Hebei Province

季节	春季	夏季	秋季	冬季
相关性	-0.497*	0.529*	-0.427	0.121

注:“\*”代表通过0.05显著性检验。

### 3.2 年尺度响应

通过年尺度NDVI与SPEI-12相关性分析(图9)可知,从整体上看,河北省相关系数区域差异明

显,全省以不显著区域为主,主要分布在河北省西北部及南部邯郸市,显著区域局部分布。具体来看,NDVI与SPEI-12指数相关系数的显著性主要以负相关为主,其中,不显著负相关所占面积最大。以极显著负相关为中心的站点有张北站和五台山站,相关系数位于显著负相关的站点有3个,分别为蔚县站、围场站和承德站。由此可见,(极)显著负相关主要位于张家口、承德等河北省北部地区,探究其原因,主要是该地降水条件与植被类型有关。首先河

北省降水为东南向西北减少的分布格局<sup>[32]</sup>,该研究区域位于少雨区,更易发生水分亏缺事件,其次该地为国家重点项目京津风沙源治理、三北防护林治理的

所在地,植被更容易受到水分条件限制。显著正相关主要位于中部地区,主要是由于中部平原区农业以灌溉为主,人为减弱了水分条件的限制<sup>[33]</sup>。

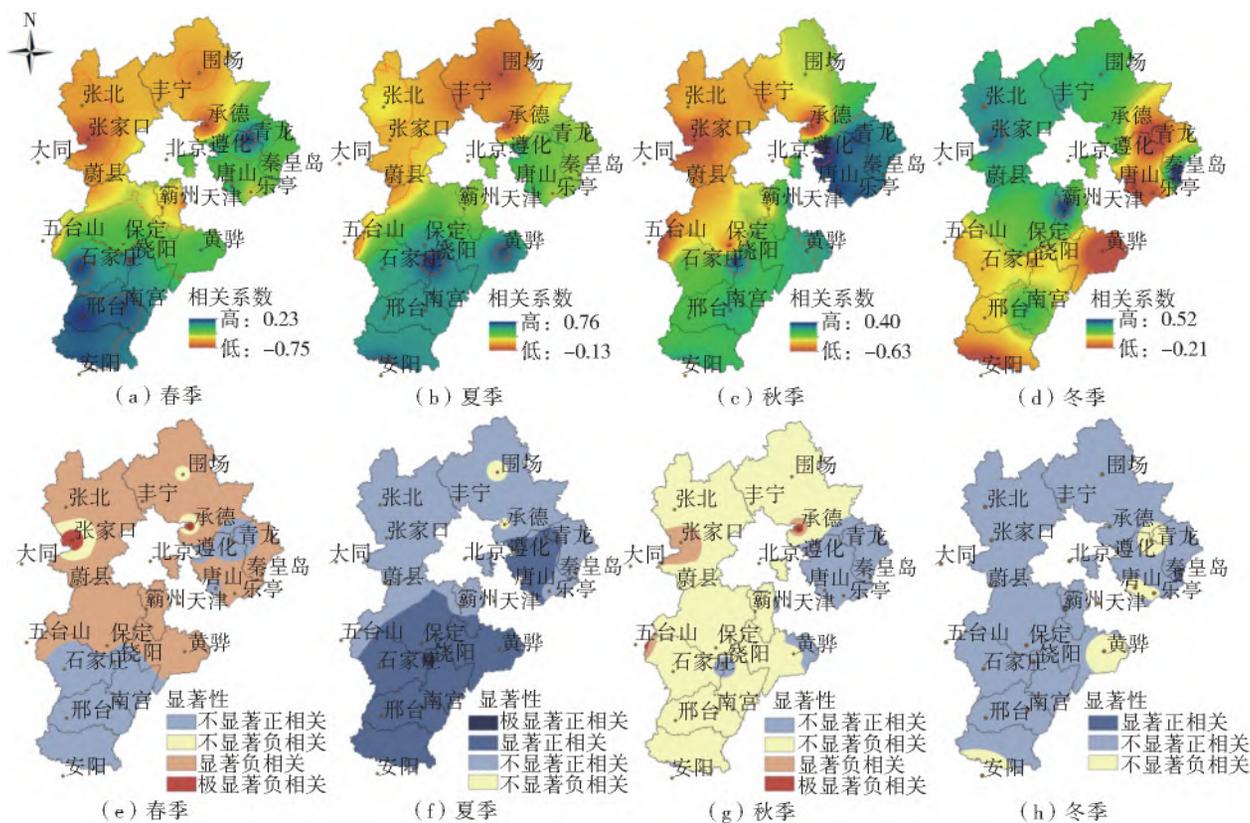


图 8 NDVI 与 SPEI-3 的相关系数、显著性空间分布

Fig. 8 Spatial distribution of the correlation coefficient and significance between NDVI and SPEI-3

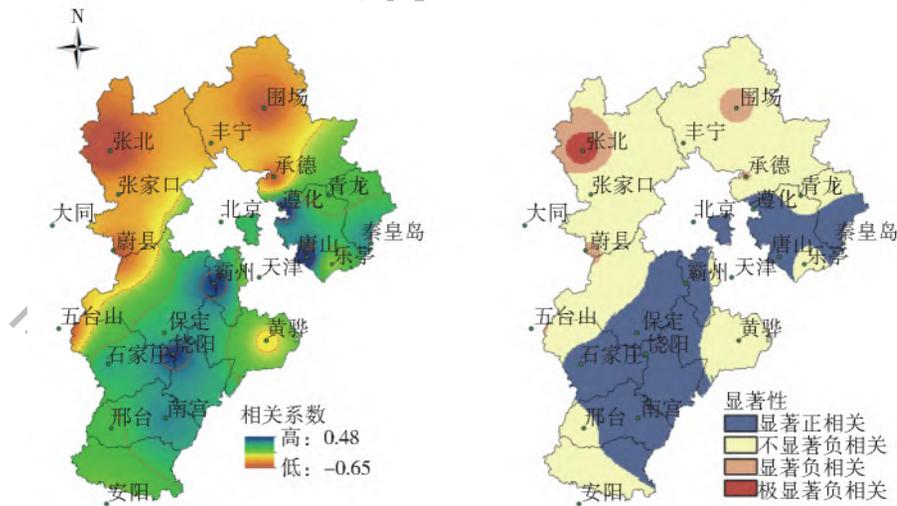


图 9 NDVI 与 SPEI-12 的相关系数、显著性空间分布

Fig. 9 Spatial distribution of the correlation coefficient and significance between NDVI and SPEI-12

## 4 讨论与结论

### 4.1 讨论

本文基于遥感多时相数据,在时空尺度上探究河北省植被变化与气象干旱的影响关系,有助于更好地理解模拟生态系统的动态变化特性,揭示干

旱变化与植被覆盖变化演变规律,同时为本地区生态系统驱动力研究提供一定理论基础。总体来看,河北省夏季植被变化与干旱的正相关性最为显著,这与河北省以耕地和林地为主的土地利用类型有关,在 6—8 月,农作物正值快速生长期,需水量巨大,同时乔木在整个生长季都需大量水分维持生

长<sup>[33]</sup>,因此在此阶段植被极易受到降水多少的影响,该结果与刘大川<sup>[34]</sup>对华北地区的研究相吻合。此外,气候变化对河北省植被覆盖的影响是复杂的,选用 SPEI 指数虽综合考虑了降水和蒸散变化,相较于其他干旱指标准确性更高,得到的分析结果在宏观上、整体上具有一定参考意义,但是在局部和精确性上与真实结果存在一定的差异,在以后的研究中要更为细致地区分土地利用类型、植被类型对气候变化响应程度造成的差异,明确土地利用演变机理与各影响要素的胁迫机制。另外,在驱动力分析上,仅探究了干旱变化对植被生长影响,更需要结合土壤、地形等下垫面要素进一步开展机理研究。

## 4.2 结 论

(1)河北省多年平均 NDVI 值在时间尺度上整体呈波动上升趋势,尤其在 2003 年出现 0.028/(10 a) 的飞跃增长;在空间尺度上,NDVI 指数呈现中部高两侧低的分布特点,空间差异较为显著。

(2)河北省在研究年段气温上升显著,空间分布呈西北-东南增加趋势,降水量从西北部-中部-东北部呈现低-中-高的分布格局。

(3)河北省多尺度 SPEI(1/3/12)值变化幅度较大,为-2.3~2.8;季节干旱变化明显,呈阶段性特征,多发生在春夏以及冬季,其中,春夏季干旱程度最深,秋季气候相对湿润。年尺度 SPEI 判断较《河北省气象公报》显示干旱严重,偏差较大;季节尺度 SPEI 值显示的河北省旱情较为合理,但个别年份存在程度偏差。

(4)河北省植被 NDVI 与 SPEI 指数相关性在季节尺度上夏季相关性最强、春秋季节次之,其中,夏季和春季达显著水平,冬季相对较弱。在年尺度上,植被 NDVI 与 SPEI 指数相关性区域差异明显,负相关主要分布在河北省西北及南部邯郸市,正相关分布于中部平原。

## 参考文献(References):

[1] 陈效逖,王恒. 1982—2003 年内蒙古植被带和植被覆盖度的时空变化[J]. 地理学报,2009,64(1):84-94. (CHEN X Q,WANG H. Temporal and spatial changes of vegetation zone and vegetation coverage in Inner Mongolia from 1982 to 2003[J]. Acta Geographica Sinica,2009,64(1):84-94. (in Chinese)) DOI:10.3321/j.issn:0375-5444.2009.01.009.

[2] PETTORELLI N,VIK J,MYSTERUD A,et al. Using the satellite-derived NDVI to assess ecological responses to environmental change[J]. Trends in Ecology &

Evolution,2005,20(9):503-510. DOI:10.1016/j.tree.2005.05.011.

- [3] NANZAD L,ZHANG J,TUVDENDORJ B,et al. NDVI anomaly for drought monitoring and its correlation with climate factors over Mongolia from 2000 to 2016 [J]. Journal of Arid Environments,2019,164(MAY):69-77. DOI:10.1016/j.jaridenv.2019.01.019.
- [4] PIEDALLU C,CHÉRET V,DENUX J P,et al. Soil and climate differently impact NDVI patterns according to the season and the stand type[J]. Science of the Total Environment, Elsevier, 2019, 651 (2): 2874-2885. DOI:10.1016/j.scitotenv.2018.10.052.
- [5] JHA S,DAS J,SHARMA A,et al. Probabilistic evaluation of vegetation drought likelihood and its implications to resilience across India[J]. Global and Planetary Change, 2019, 176: 23-35. DOI: 10.1016/j.gloplacha.2019.01.014.
- [6] KINCER J B. The seasonal distribution of precipitation and its frequency and intensity in the United States [J]. Research Progress Report-Western Society of Weed Science (USA), 1992, 3 (3): 109-27. DOI: 10.1175/1520-0493(1919)472.0.CO;2.
- [7] MARCOVITCH S. The measure of droughtiness[J]. Monthly Weather Review, 1930, 58(3): 113-113. DOI: 10.1175/1520-0493(1930)582.0.CO;2.
- [8] MC QUIJ J. A simple index of drought conditions[J]. Weatherwise, 1954, 7 (3): 64-67. DOI: 10.1080/00431672.1954.9930323
- [9] 张更喜,粟晓玲,郝丽娜,等. 基于 NDVI 和 scPDSI 研究 1982—2015 年中国植被对干旱的响应[J]. 农业工程学报,2019,35(20):145-151. (ZHANG G X,SU X L,HAO L N,et al. Research on the response of Chinese vegetation to drought from 1982 to 2015 based on NDVI and scPDSI [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering,2019,35(20):145-151. (in Chinese)) DOI:CNKI;SUN;NYGU.0.2019-20-018.
- [10] 胡君德,李百岁,萨楚拉,等. 2000—2012 年鄂尔多斯高原植被动态及干旱响应[J]. 测绘科学,2018,43(4):49-58. (HU J D,LI B S,SA C L,et al. Vegetation dynamics and drought response on the Ordos Plateau from 2000 to 2012[J]. Science of Surveying and Mapping,2018,43(4):49-58. (in Chinese)) DOI:10.16251/j.cnki.1009-2307.2018.04.008.
- [11] 河北省林业和草原局. 河北省林业草原情况简介 [EB/OL],2019. (Forestry and Grassland Bureau of Hebei Province. Brief introduction of forestry and grassland in Hebei Province[EB/OL],2019. (in Chinese))
- [12] 中国林业网. 2019 年中国国土绿化状况公报. [EB/OL],2020. (China Forestry Net. Bulletin of China's

- land greening status in 2019. [EB/OL], 2020. (in Chinese)) <http://www.forestry.gov.cn/>.
- [13] 王莹. 河北省重要生态功能保护区研究[D]. 石家庄: 河北师范大学, 2011. (WANG Y. Research on important ecological function protection areas in Hebei Province [D]. Shijiazhuang: Hebei Normal University, 2011. (in Chinese)) DOI:CNKI;CDMD;2. 1011. 147737.
- [14] 方黎明, 王多银, 房皓. 基于标准化降水蒸散指数的宁夏中部干旱带干旱趋势分析[J]. 科学技术与工程, 2019, 19(14): 336-345. (FANG L M, WANG D Y, FANG H. Drought trend analysis in the arid zone of central Ningxia based on standardized precipitation evapotranspiration index[J]. Science Technology and Engineering, 2019, 19(14): 336-345. (in Chinese)) DOI:CNKI;SUN;KXJS. 0. 2019-14-051.
- [15] 史建国, 严昌荣, 何文清, 等. 黄河流域潜在蒸散量时空格局变化分析[J]. 干旱区研究, 2007(6): 6773-6778. (SHI J G, YAN C R, HE W Q, et al. Analysis on the temporal and spatial patterns of potential evapotranspiration in the Yellow River basin [J]. Arid Zone Research, 2007(6): 6773-6778. (in Chinese)) DOI:10. 13866/j. azr. 2007. 06. 012.
- [16] 徐泽华. 山东省植被时空变化特征及其对气象干旱指数的响应[D]. 济南: 山东师范大学, 2019. (XU Z H. The characteristics of spatial and temporal changes of vegetation in Shandong Province and its response to meteorological drought index [D]. Jinan: Shandong Normal University, 2019. (in Chinese))
- [17] 张强, 邹旭恺, 肖风劲, 等. 气象干旱等级(GB/T 20481—2017), 中华人民共和国国家标准. 北京: 中国标准出版社, 2017: 12-17. (ZHANG Q, ZOU X K, XIAO F J, et al. Meteorological drought grade(GB/T 20481—2017), National Standard of the People's Republic of China. Beijing: China Standards Press, 2017: 12-17. (in Chinese))
- [18] 马献菊, 蔡元刚, 刘皓, 等. 基于 SPEI 干旱指数的凉山州干旱特征分析[J]. 高原山地气象研究, 2019, 39(3): 53-59. (MA X J, CAI Y G, LIU H, et al. Analysis of drought characteristics in Liangshan prefecture based on SPEI drought index[J]. Plateau and Mountain Meteorology Research, 2019, 39(3): 53-59. (in Chinese)) DOI:CNKI;SUN;SCCX. 0. 2019-03-009.
- [19] 姜康, 包刚, 乌兰图雅, 等. 2001—2017 年蒙古高原不同植被返青期变化及其对气候变化的响应[J]. 生态学杂志, 2019, 38(8): 2490-2499. (JIANG K, BAO G, WULAN T Y, et al. Changes in the regreening period of different vegetations on the Mongolian Plateau from 2001 to 2017 and its response to climate change [J]. Journal of Ecology, 2019, 38(8): 2490-2499. (in Chinese)) DOI:10. 13292/j. 1000-4890. 201908. 027.
- [20] 尹海魁, 赵文廷, 李超, 等. 基于生态分区的河北省植被覆盖时空变化特征研究[J]. 土壤通报, 2016, 47(1): 29-35. (YIN H K, ZHAO W T, LI C, et al. Research on the spatio-temporal changes of vegetation coverage in Hebei Province based on ecological zoning [J]. Soil Bulletin, 2016, 47(1): 29-35. (in Chinese)) DOI:10. 19336/j. cnki. trtb. 2016. 01. 005.
- [21] 阎世杰, 王欢, 焦珂伟. 京津冀地区植被时空动态及定量归因[J]. 地球信息科学学报, 2019, 21(5): 767-780. (YAN S J, WANG H, JIAO K W. The spatiotemporal dynamics and quantitative attribution of vegetation in the Beijing-Tianjin-Hebei region [J]. Journal of Geo-Information Science, 2019, 21(5): 767-780. (in Chinese))
- [22] 许翔驰. 中国植被时空变化特征[J]. 哈尔滨师范大学自然科学学报, 2019, 35(2): 100-104. (XU X C. Characteristics of spatial and temporal changes of vegetation in China [J]. Journal of Natural Science of Harbin Normal University, 2019, 35(2): 100-104. (in Chinese))
- [23] 曹永强, 李晓瑞, 朱明明. 河北省主要作物系数时空分布特征[J]. 水利水电科技进展, 2019, 39(2): 37-45. (CAO Y Q, LI X R, ZHU M M. Temporal and spatial distribution characteristics of main crop coefficients in Hebei Province [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources and Hydropower, 2019, 39(2): 37-45. (in Chinese)) DOI:CNKI;SUN;SLSD. 0. 2019-02-010.
- [24] 王芳, 张路路. 沧州市耕地多功能耦合协调度的演变[J]. 河北农业科学, 2019, 23(3): 37-43. (WANG F, ZHANG L L. The evolution of multifunctional coupling coordination degree of cultivated land in Cangzhou City [J]. Hebei Agricultural Sciences, 2019, 23(3): 37-43. (in Chinese))
- [25] 朱彩芬, 胡桃花. 1957—2017 年朔州气温变化特征分析[J]. 中国农学通报, 2019, 35(23): 103-109. (ZHU C F, HU T H. Analysis on the characteristics of temperature changes in Shuozhou from 1957 to 2017 [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2019, 35(23): 103-109. (in Chinese))
- [26] 河北省气候局. 河北省气候公报[R]. 2017. (Climate Bureau of Hebei Province. Climate Bulletin of Hebei Province [R]. 2017. (in Chinese))
- [27] 郭燕云, 胡琦, 傅玮东, 等. 基于 SPEI 指数的新疆天山草地近 55 a 干旱特征[J]. 干旱区研究, 2019, 36(3): 670-676. (GUO Y Y, HU Q, FU W D, et al. Drought characteristics of Xinjiang Tianshan grassland based on SPEI index in recent 55 years [J]. Arid Zone Research, 2019, 36(3): 670-676. (in Chinese)) DOI:10. 13866/j. azr. 2019. 03. 18.
- [28] 史尚渝. 黄土高原气象干旱时空变化及其对植被的影

- 响[D].北京:中国科学院大学(中国科学院教育部水土保持与生态环境研究中心),2019.(SHI S Y. Temporal and spatial changes of meteorological drought on the Loess Plateau and its impact on vegetation [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences(Soil and Soil Conservation and Ecological Environment Research Center of Ministry of Education, Chinese Academy of Sciences),2019. (in Chinese))
- [29] 赵玉兵. 河北省南部气候变化对冬小麦气候适宜度的影响[D].保定:河北农业大学,2013.(ZHAO Y B. The impact of climate change in southern Hebei Province on the climate suitability of winter wheat[D]. Baoding: Hebei Agricultural University,2013. (in Chinese))
- [30] 曹永强,王菲,齐静威. 河北省夏玉米生育期气象要素变化特征及相关性[J]. 南水北调与水利科技(中英文),2020,18(5):182-192.(CAO Y Q, WANG F, QI J W. Variation characteristics and correlation of meteorological elements during the growth period of summer corn in Hebei Province[J]. South-to-North Water Diversion and Water Conservancy Science and Technology (Chinese-English), 2020, 18(5): 182-192. (in Chinese))
- [31] 孔冬冬,张强,顾西辉,等. 植被对不同时间尺度干旱事件的响应特征及成因分析[J]. 生态学报,2016,36(24):7908-7918.(KONG D D, ZHANG Q, GU X H, et al. Vegetation response characteristics and causes analysis of drought events at different time scales[J]. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(24): 7908-7918. (in Chinese)) DOI: 10. 5846/stxb20150611182.
- [32] 张晓龙,黄领梅,沈冰. 河北省降水时空变化特征分析[J]. 水资源与水工程学报,2014,25(2):140-143,148.(ZHANG X L, HUANG L M, SHEN B. Analysis on the characteristics of temporal and spatial changes of precipitation in Hebei Province[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2014, 25(2): 140-143, 148. (in Chinese)) DOI: 10. 11705/j. issn. 1672-643X. 2014. 02. 29.
- [33] 夏哲超,潘志华,张璐阳,等. 基于水分的北方农牧交错带植被生态系统退化机理研究:以武川县为例[J]. 资源科学,2010,32(2):317-322.(XIA Z C, PAN Z H, ZHANG L Y, et al. Research on the degradation mechanism of vegetation ecosystem in northern farming-pastoral zone based on moisture: Taking Wuchuan County as an example[J]. Resources Science, 2010, 32(2): 317-322. (in Chinese)) DOI: CNKI: SUN: ZRZY. 0. 2010-02-021.
- [34] 刘大川,周磊,武建军. 干旱对华北地区植被变化的影响[J]. 北京师范大学学报(自然科学版),2017,53(2):222-228,124.(LIU D C, ZHOU L, WU J J. The impact of drought on vegetation changes in north China[J]. Journal of Beijing Normal University(Natural Science Edition), 2017, 53(2): 222-228, 124. (in Chinese)) DOI: 10. 16360/j. cnki. jbnuns. 2017. 02. 018.

## Spatial and temporal variation of vegetation and its response to meteorological drought in Hebei Province

CAO Yongqiang, WANG Fei

(School of Geographical Sciences, Liaoning Normal University, Dalian 116029, China)

**Abstract:** Vegetation as an important part of the terrestrial ecosystem, it links the atmosphere, hydrosphere, and soil circle, and is a reflection and indication of regional climate characteristics. With the construction advancement of the Three-North Shelterbelt and the conversion of farmland to forest and grassland, vegetation growth is being affected by human activities. Hebei Province has a forest coverage rate of 34% by the end of 2018. At the same time, it has fully promoted the three-year national land greening initiative. In 2019, 684,000 hectares of afforestation were completed, accounting one-tenth of the total number of afforestation in the country. The semi-humid and semi-arid continental monsoon climate in Hebei Province and the geographical location of the farming-pastoral zone determine its ecological environment self-regulation ability, and it is extremely vulnerable to meteorological disasters, especially drought. Therefore, in the context of global warming, the accelerated frequency of climate extremes, and the increase in the intensity of human activities, comprehensive exploration of vegetation growth characteristics and attribution analysis has an important practical significance.

The research methods include SPEI (standardized precipitation evapotranspiration index) and correlation analysis. The SPEI index not only considers precipitation and evapotranspiration but also retains the sensitivity to temperature and precipitation such as SPI (standardized precipitation index) and PDSI (palmer drought index). Describing drought objectively, correlation analysis and the inverse distance weighted interpolation method is used in ArcGIS, SPEI raster map combined with NDVI image to calculate the spatial correlation distribution map of NDVI and SPEI, and conduct a significance test to analyze the spatial relationship between NDVI and drought index.

Hebei Province's multi-year average NDVI fluctuates and rises on the time scale, especially in 2003, and it display a rapid increase of 0.028/(10 a), showing the distribution characteristics of high and low in the middle on the spatial scale. The increase of temperature is significant, and the spatial distribution shows an increasing trend from northwest to southeast in Hebei Province.

(下转第 757 页)

of the protected area. Operability does not provide a method and procedure for the classification of riverfront groundwater sources because of their special characteristics.

To accurately determine the type of water source area, the land area of the protected area is calculated by empirical formula, and the results of pumping test are used to calculate the parameters of a complete well of phreatic water. The hydraulic gradient of group well is calculated accurately by the iterative operation of the interpolation method. The radius of the protected area is finally calculated with the radius of the empirical value. The analogy and empirical method are used to divide the water area of the protected area, taking into account the surrounding river and the influence of factors such as the distribution of upstream pollution sources, the size of risk sources, and river water quality on the size of the protected area. Finally, the scope of the protected area is revised according to the surrounding terrain and ground conditions.

The type of Wangmu water source area is medium and small-sized pore phreatic water source area. The lithology of the phreatic water aquifer is mainly medium-coarse sand. The radius of the land area of the first-class protection area is 66.5 m and that of the second-class protection area is 665.0 m. The water area of the first-class protected area divided by analogy and is extended to 1 000 m to the upper reaches and 100 m to the lower reaches of the Hutuo River. The water area of the second-class protected area extends 2 000 m to the upper reaches of the Hutuo River and 770 m to the lower reaches of the first-class protected area.

**Conclusions** (1) The investigation of the basic environmental conditions of the riverside groundwater sources and the nearby rivers is an important prerequisite for the division of the protection zones, and the flow direction and velocity of groundwater and surface water should be fully considered, according to the distribution of pollution sources, the migration and diffusion of pollutants, the pollution source type and risk grade can be determined accurately. (2) Taking into full account the hydrogeological characteristics of the region, combining with the geomorphological features and genetic analysis of the rivers near the region, comprehensively utilizing the information of well structure map and hydrogeological section map, etc., accurately judging the type of riverfront groundwater source area. (3) When choosing the method of the protection zone division of riverfront groundwater source area, the relationship between groundwater and river and the influence of groundwater exploitation on the quality and quantity of river water are fully considered. The radius of the protected area is calculated by the empirical formula method and the land area is divided, and the water area is divided by the analogy empirical method, the combination of the two methods is suitable for the division of the groundwater source protection area near the river, which is closely connected with the surrounding rivers. (4) The definition of the scope of the riverside groundwater source protection area should be based on the actual situation of the topography and topography of the area, the distribution of pollution sources, the flow direction of groundwater and surface water, etc., to facilitate the daily environmental management of the protected area, the boundary of the union area divided by the river-type water source and the groundwater-type water source is revised, wherever possible, clearly marked features should be used as the boundary of the protected area.

**Key words:** riverside type; groundwater source area; protected area division; empirical formula method; analogy empirical method

(上接第 719 页)

Precipitation presents a low-medium-high distribution pattern from northwest-central-northeast. The area and frequency of droughts are the highest in spring, and the high frequency area of summer drought is located in Tangshan in Zhangjiakou, the frequency of drought is the lowest in autumn, and light drought is dominant in winter. The correlation between vegetation NDVI and SPEI is strongest in summer (0.529), followed by spring and autumn, and relatively weak in winter. The central area of Yuxian Station, Zhangbei Station and Chengde Station are mainly negatively correlated, and the positively correlated are mainly distributed in the central region.

**Conclusions** (1) The multi-scale SPEI (1/3/12) value of Hebei Province has a large range of changes, and the seasonal drought has obvious changes with phase characteristics, which mostly occur in spring, summer and winter. The annual scale SPEI judgment shows that the drought is serious and has a large deviation "Hebei Meteorological Bulletin". The seasonal scale SPEI value shows the drought situation in Hebei Province is more reasonable, but there is a degree of deviation in some years. (2) The correlation between NDVI and SPEI on a seasonal scale, with the strongest correlation in summer, followed by spring and autumn, and the weakest in winter. On the annual scale, the correlation between vegetation NDVI and SPEI has obvious regional differences.

**Key words:** NDVI; vegetation cover; meteorological drought; response analysis; Hebei Province