

# 河北省 1995—2015 年水旱灾害生态风险时空变化特征

谢宝妮<sup>1,2,3</sup>, 秦占飞<sup>1,3</sup>, 李 镇<sup>1,3</sup>, 杨会彩<sup>1,3</sup>

(1.河北地质大学 土地科学与空间规划学院, 石家庄 050031; 2.中国科学院 地理科学与资源研究所  
生态系统网络观测与模拟重点实验室, 北京 100101; 3.河北省水资源可持续利用与开发实验室, 石家庄 050031)

**摘要:**水旱灾害是河北省最严重的农业气象灾害因子,为了探明河北省近 20 a 水旱灾害生态风险时空转变过程,根据区域生态风险评价理论,基于气温、降雨、土地利用、GDP 和人口密度等多源数据,以干旱和洪涝灾害为风险源,以耕地、林地、草地、水域、建设用地和未利用地 6 种景观类型为风险受体,基于 GIS 技术对河北省 1995—2015 年水旱灾害生态风险时空特征进行了分析。结果表明:1995—2015 年河北省水旱灾害风险概率总体中等,中等风险以下等级占全域总面积的 51.39%~93.30%,较高风险和高风险占全域面积的 6.70%~48.61%。河北省近 20 年水旱灾害生态风险等级的空间异质性非常明显,较低风险以下约占全省面积的 57.87%~74.10%,主要位于河北省北部、太行山山地等区域,较高和高风险等级约占全省面积的 4.90%~20.08%,主要分布在南部平原地区。从时空变化来看,河北省近 20 a 水旱灾害生态风险约 37.70%面积呈下降趋势,主要分布在冀中南北部、承德市中部及唐山市等地区,以较低风险向低风险转变和中等风险向较低风险转变为主。河北省近 20 a 水旱灾害生态风险总体风险较低,且呈现降低趋势,该研究可为灾害风险管理及环境管理和决策提供科学依据。

**关键词:**地理学;水旱灾害;区域生态风险评价;时空变化;河北省

中图分类号:Q149;P954

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2021)05-0196-09

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2021.05.023

## Spatial and Temporal Variation of Ecological Risk for Flood and Drought in Hebei Province from 1995 to 2015

XIE Baoni<sup>1,2,3</sup>, QIN Zhanfei<sup>1,3</sup>, LI Zhen<sup>1,3</sup>, YANG Huicai<sup>1,3</sup>

(1.School of Land Science and Space Planning, Hebei GEO University, Shijiazhuang 050031, China; 2.Key Laboratory of Ecosystem Network Observation and Modeling, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; 3.Hebei Province Key Laboratory of Sustained Utilization and Development of Water Resources, Hebei GEO University, Shijiazhuang 050031, China)

**Abstract:** Flood and drought disasters are two of the most serious agro-meteorological disasters in Hebei Province. In order to explore the temporal and spatial transformation process of the ecological risk of floods and droughts in Hebei Province in the past 20 years, we explored the spatial and temporal patterns of the ecological risks of floods and droughts in Hebei Province during 1995—2015 according to the regional ecological risk assessment theory. We estimated the ecological risks using GIS techniques based on multi-source data such as temperature, rainfall, land use, GDP and population density, with the drought and flood disasters as the risk sources and the six landscape types (i. e., cultivated land, woodland, grassland, water area, construction land, and unused land) as risk receptors. The results showed that there was a moderate overall ecological risk level of flood and drought disasters in Hebei Province during 1995—2015; specifically, the area at moderate or lower ecological risk levels accounted for 51.39%~93.30% of the total area of the study area, and the area at high or very high ecological risk levels accounted for 6.70%~48.61% of the total area of the study area during the study period; there was significant spatial heterogeneity of the ecological risk in the study area during the past two decades; the areas with low ecological risk were primarily located in the northern part and Taihang Mountains of the study area, accounting for 57.87%~74.10% of the total area of the study area, while areas with high and very high ecological risk were mainly located in the southern plain areas

收稿日期:2020-10-10

修回日期:2020-11-13

资助项目:国家自然科学基金项目(42001380);河北省水利科技计划项目(2018-67);河北省高等学校青年拔尖人才计划项目(BJ2018041)

第一作者:谢宝妮(1986—),女,陕西蓝田人,讲师,博士,研究方向为遥感与 GIS 应用。E-mail:xbn-feya@nwafu.edu.cn

通信作者:李镇(1984—),男,河北秦皇岛人,副教授,博士,研究方向为土壤侵蚀与水土保持研究。E-mail:lizhen@hgu.edu.cn

of the study area, accounting for 4.90%~20.08% of the total area of the study area; there was remarkable spatial and temporal variation of the ecological risk in the study area during the study period; the ecological risk level showed a declining trend in approximately 37.70% of the study area during the past two decades, these mainly covered northern and central part of the study area, central part of Chengde and Tangshan, where the ecological risk primarily shifted from the low level to the very low level and from the moderate level to the low level; the overall ecological risk of flood and drought disasters in Hebei Province in the past 20 years was relatively low and showed a decreasing trend. All these findings in this study can provide significant scientific basis for decision-making on the disaster risk management and environmental management.

**Keywords:** geography; flood and drought disasters; regional ecological risk assessment; spatial and temporal change; Hebei Province

干旱是河北省最严重的农业气象灾害<sup>[1-2]</sup>,而暴雨和强对流天气是河北省主要致人死亡的气象灾害<sup>[3-4]</sup>,二者也是影响作物产量的主要灾害因子。近30 a来全球气温上升迅速,极端降雨频率加剧<sup>[5]</sup>,同时伴随着人类活动与区域开发力度不断加大,生态系统类型、结构和功能发生强烈改变,水资源供需矛盾突出,导致区域水旱灾害生态风险日益加重。因此,对河北省水旱灾害的时空分布及其生态风险进行评价,可更好的了解河北省不同地区水旱灾害生态风险变化情况。

区域生态风险评价(Regional Ecological Risk Assessment, RERA)是结合风险源、风险受体和生态终点,在区域尺度评价对自然和人为活动对生态系统产生的正面或负面影响的可能性<sup>[6]</sup>。目前,国外RERA多针对自然灾害(气象、水旱和地质等)<sup>[7-9]</sup>或特殊生态破坏(水域污染、矿区污染和生境破坏等)<sup>[10]</sup>进行研究,如湿地、水域、矿区、道路和突发性石油污染等。国内则侧重于流域自然灾害风险评价,风险源涉及洪涝、干旱、台风及冻灾等自然灾害<sup>[11]</sup>,也有部分涉及城市化等人为活动影响的生态风险评价<sup>[12]</sup>。内容在单风险因子<sup>[13-16]</sup>和多风险因子结合<sup>[17-19]</sup>方面均有涉及,且多数在流域尺度对景观类型风险进行评价<sup>[20-21]</sup>。

目前,研究者对河北省水旱灾害风险开展了多方面深入的研究,研究多集中在水旱灾害分布<sup>[22-29]</sup>、水旱灾害评价<sup>[13,30-36]</sup>、以及减灾政策方面<sup>[37-38]</sup>,而基于RERA对长时间序列水旱灾害生态风险时空变化研究相对较少。因此,本研究针对河北省水旱灾害生态风险问题,根据生态风险评价的定义和特点,基于RERA理论和GIS技术,构建综合生态风险模型,对河北省水旱灾害生态风险进行综合评价,并进一步分析近20 a水旱灾害生态风险时空转变过程。研究结果可为政府部门进行环境管理和决策提供科学依据。

## 1 研究区概况

河北省位于华北平原北部,属温带大陆性季风气候,经纬度范围为36°03'—42°40'N,113°27'—119°50'E,地形地貌复杂,北部为坝上高原和燕山山脉、西部为太行山脉、东部为丘陵及海滨地区、南部为华北平原。气候属温带大陆性季风气候,四季分明,雨量多集中在夏季,降水变率高达20%~30%<sup>[23]</sup>,年均气温从北部的0℃上升到东部的13℃,年降雨量300~800 mm。主要植被类型为亚高山草甸、针叶林及针阔混交林等。河北省有12个土类,以棕壤、褐土、潮土和栗钙土等土壤类型为主。

## 2 数据来源及处理

### 2.1 数据来源

1990—2015年京津冀24个气象站点月平均气温和降雨量数据来源于中国气象数据网(<http://www.cma.gov.cn>),DEM(90 m)来源于地理空间数据云(<http://www.gscloud.cn/>),河流水系、行政区划边界、以及1995—2015年每5 a间隔土地利用/土地覆盖、人口密度、GDP(1 km)数据来源于资源环境数据云平台(<http://www.resdc.cn/>),为了便于分析,所有栅格数据重采样到1 km进行运算。

### 2.2 数据处理

2.2.1 数据标准化 由于各数据因子单位不同,需对其进行标准化处理,本研究采用公式法和专家分级赋值法对数据进行标准化<sup>[39]</sup>。当数据分布不规则时采用专家分级赋值法将其隶属度归一化取值到0.1~0.9值域,当数据分布规则时,采用公式法进行标准化,公式如下:

$$N = \frac{I - I_{\min}}{I_{\max} - I_{\min}} \times (0.9 - 0.1) + 0.1 \quad (1)$$

式中: $I$ 为原始序列; $I_{\max}$ 和 $I_{\min}$ 分别为其最大值和最小值; $N$ 为进行标准化后的数据序列。

2.2.2 标准化降水蒸散指数 标准化降水蒸散指数(Standardized Precipitation Evapotranspiration Index, SPEI)常用来表征气温和降水对干旱发生的共同效应。本研究使用1个月尺度的SPEI值进行干旱和雨涝等级

划分<sup>[27,40-41]</sup>(表 1),SPEI 计算公式如下:

$$\text{SPEI} = w - \frac{c_0 + c_1 w + c_2 w^2}{1 + d_1 w + d_2 w^2 + d_3 w^3} \quad (2)$$

式中: SPEI 为标准化降水蒸散指数;  $w$  为概率加权矩; 常数  $c_0 = 2.515517$ ,  $c_1 = 0.8022853$ ,  $c_2 = 0.010328$ ,  $d_1 = 1.432788$ ,  $d_2 = 0.189269$ ,  $d_3 = 0.001308$ 。本研究使用 R 软件中的 SPEI 包<sup>[42]</sup>进行 SPEI 计算,并将结果插值为 1 km 栅格数据。

表 1 SPEI 等级分类标准

SPEI	等级
$\text{SPEI} < -2.0$	特旱
$-2.0 \leq \text{SPEI} < -1.5$	重旱
$-1.5 \leq \text{SPEI} < -1$	中旱
$-1 \leq \text{SPEI} < -0.5$	轻旱
$-0.5 \leq \text{SPEI} < 0.5$	正常
$0.5 \leq \text{SPEI} < 1$	轻涝
$1 \leq \text{SPEI} < 1.5$	中涝
$1.5 \leq \text{SPEI} < 2$	重涝
$\text{SPEI} \geq 2$	特涝

2.2.3 降水量距平指标 降水变率可作为反映干旱或洪水的实时指标,河北省汛期多集中在 6—9 月,因此本研究基于月降雨量数据,计算每年汛期降水变率,公式如下:

$$D_p = \frac{P_m - \bar{P}}{\bar{P}} \times 100\% \quad (3)$$

式中:  $D_p$  为降水变率(%);  $P_m$  为每年 6—9 月降雨量(mm);  $\bar{P}$  为多年平均降雨量(mm)。

### 3 评价过程

#### 3.1 评价模型

本研究根据 RERA 理论,将生态风险( $R$ )视为风险概率( $P$ )、生态损失度( $L$ )和社会经济易损度( $V$ )3 大因子的函数<sup>[43]</sup>,公式如下:

$$R = P \times L \times V \quad (4)$$

式中:  $R$  为生态风险;  $P$  为风险概率;  $L$  为生态损失度;  $V$  为社会经济易损度。

#### 3.2 综合风险概率计算

3.2.1 干旱 风险源一般以其发生的概率、强度和范围来表述,本研究基于气象站点降水量和气温数据,计算 SPEI 值,按照表 1 标准统计每 5 a 间隔干旱频次,并使用反距离加权法进行空间插值,得到 1995—2015 年河北省每 5 a 间隔的以干旱发生频率度量的干旱风险分布数据。

3.2.2 洪水 河北省洪水灾害原因较多,主要包括气候、河流、地形、土壤等,其中气候为主导因素。本研究结合 GIS 方法,选取洪水频率、降雨量、地形和

河流等因素,分析综合降水因子、综合地形特征和河流水系对洪水灾害的危险指数,然后基于层次分析法对三者进行权重叠加,得到洪水灾害风险分布数据。

根据降水变率越高(公式 3),降水越多,综合降水因子越大,洪水危害也越大的原则,采用专家打分法确定标准(表 2),并据此得到每 5 a 间隔降水变率影响度数据。根据高程越低,越易被洪水淹没,高程标准差越低,洪水危险指数越高的原则确定综合地形因子对洪水灾害影响的分级标准(表 3)。距离河流越近,越易产生洪灾,且河流越宽影响范围越大,因此结合河流等级和高程数据,确定河流分级、缓冲区宽度及影响程度(表 4),一级为 0.9,二级为 0.8,其他区域为 0.5,最终得到河流影响度分布图。

表 2 降水变率和降雨量影响度分级

降水变率	降雨量/mm				
	<332	332~379	379~427	427~478	>556
<7	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7
7~14	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8
>14	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9

表 3 综合地形因子影响度分级

高程标准差	绝对高程/m				
	<237	237~602	602~949	949~1308	>1308
<20.05	0.9	0.8	0.7	0.6	0.5
20.05~51.42	0.8	0.7	0.6	0.5	0.4
>51.42	0.7	0.6	0.5	0.4	0.3

表 4 河流缓冲区分级及缓冲区宽度标准

河流级别	高程/m				
	<237	237~602	602~949	949~1308	>1308
一级缓冲区	干流	7000	6000	5000	4000
	一级支流	6000	5000	4000	3000
	二级支流	5000	4000	3000	2000
二级缓冲区	干流	14000	12000	10000	8000
	一级支流	12000	10000	8000	6000
	二级支流	10000	8000	6000	4000

采用层次分析法确定上述因子权重,通过求解判断矩阵,得到历史洪灾频次权重为 0.455,综合降水权重为 0.263,综合地形权重为 0.141,河流水系权重为 0.141。基于上述权重将各因子洪灾危险性影响度分布图进行叠加计算,得到洪水风险概率分布图。为了与土地利用和 GDP 数据时间相匹配,1990—1995 年 5 a 间的总干旱及洪灾频率记为 1995 年干旱和洪灾频率,其余年份以此类推。最终通过专家咨询法确定干旱风险源权重为 0.6,洪水风险源权重为 0.4,叠加得到综合风险概率空间分布数据,公式如下:

$$P = 0.6 \times P_1 + 0.4 \times P_2 \quad (5)$$

式中:  $P$  为风险概率;  $P_1$  为干旱风险源发生概率;  $P_2$  为洪水风险源发生概率。

3.3 综合生态损失度计算

根据河北省土地利用数据,将耕地、林地、草地、水域、建设用地和未利用地作为生态风险受体,通过建立景观类型损失指数、景观结构指数和景观脆弱度指数来确定综合生态损失度(公式 6—8):

$$L = \sum_{i=1}^N \frac{A_i}{A} R_i$$

$$R_i = S_i \times F_i$$

$$S_i = a \times C_i + b \times N_i + c \times D_i$$

式中: $L$  为生态损失度; $N$  为景观组分类型个数; $A_i$  为第  $i$  类景观类型面积; $A$  为景观类型组分总面积; $R_i$  为第  $i$  类景观类型的景观损失指数; $S_i$  为景观结构指数; $F_i$  为景观脆弱度指数。参考以往研究,各风险受体脆弱度从高到低依次排序为:未利用地 6,水体 5,耕地 4,草地 3,林地 2,建设用地 1,将各受体数值标准化到 0.1~0.9 范围; $C_i$  为景观破碎度指数, $C_i = \frac{n_i}{A_i}$ , $n_i$  为景观类型组分  $i$  的斑块数; $N_i$  为景观分离度

指数, $N_i = \frac{1}{2} \times \sqrt{\frac{n_i}{A}} \times \frac{A}{A_i}$ ;  $D_i$  为景观优势度指数; $D_i = \ln(N) + \sum_{i=1}^N [M_i \times \ln(M_i)]$ ;  $M_i$  为第  $i$  类景观类型所占面积的比例; $a, b, c$  为 3 种景观指数各自权重系数,分别赋值为 0.6, 0.3, 0.1<sup>[44]</sup>。

根据公式(7)计算得到  $R_i$ ,将河北省划分为 2 002 个 10 km×10 km 的风险格网,计算每个格网的  $L$  值,然后将格网中心的  $L$  值转为点数据,采用普通克里金方法将其插值为栅格数据,得到河北省 1995—2015 年每 5 a 间隔综合生态损失度分布数据(1 km)。

3.4 综合社会经济易损性计算

社会经济条件可反映区域灾害易损性高低,本研究选取人口密度和 GDP 密度计算综合社会经济易损性来评价水旱灾害社会经济易损程度。根据两者统计特征(均值和标准差),共划分 5 个等级,并赋值 0.5~0.9 的影响度(表 5—6),并将两者等权重相加,得到每 5 a 间隔综合社会经济易损度数据。

表 5 GDP 密度分级标准

影响度	GDP 密度/(万元·km <sup>-2</sup> )				
	1995 年	2000 年	2005 年	2010 年	2015 年
0.5	<748.27	<144.79	<307.61	<495.04	<717.62
0.6	748.27~4512.71	144.79~931.26	307.61~1636.94	495.04~2237.84	717.62~3721.35
0.7	4512.71~8277.14	931.26~1717.72	1636.94~2966.27	2237.84~3980.65	3721.35~6725.09
0.8	8277.14~12041.58	1717.72~2504.19	2966.27~4295.60	3980.65~5723.46	6725.09~9728.82
0.9	>12041.58	>2504.19	>4295.60	>5723.46	>9728.82
平均值	1496.55	289.58	615.23	990.08	1435.24
标准差	3764.43	786.47	1329.33	1742.81	3003.73

表 6 人口密度分级标准

影响度	人口密度/(人·km <sup>-2</sup> )				
	1995 年	2000 年	2005 年	2010 年	2015 年
0.5	<171.45	<177.57	<183.64	<192.08	<200.48
0.6	171.45~591.19	177.57~674.85	183.64~649.54	192.08~837.16	200.48~834.22
0.7	591.19~1010.93	674.85~1172.13	649.54~1115.44	837.16~1482.24	834.22~1467.96
0.8	1010.93~1430.67	1172.13~1669.41	1115.44~1581.34	1482.24~2127.33	1467.96~2101.70
0.9	>1430.67	>1669.41	>1581.34	>2127.33	>2101.70
平均值	342.90	355.134	367.27	384.15	400.95
标准差	419.74	497.284	465.90	645.08	633.74

利用公式(4)对综合风险概率、综合生态损失度和综合社会经济易损度者进行叠加计算,采用自然间断法进行 5 级分类,为了使结果具有可比性,将 3 者均标准化到 1~10 后进行计算,得到河北省 1995—2015 年每间隔 5 a 的综合生态风险数据。

4 结果与分析

4.1 水旱灾害综合风险概率时空变化

从图 1 可看出,1995—2015 年河北省水旱灾害风险概率总体中等,中等风险以下等级占全域总面积

51.39%~93.30%;较高风险和高风险占全域面积的 6.70%~48.61%。He 等<sup>[45]</sup>研究指出华北平原旱灾风险处于低和中等等级,本文与其研究结果较为一致。河北省 1995—2010 年水旱灾害综合风险概率总体呈上升趋势,上升区域主要分布在河北省北部地区,2010—2015 年多数区域风险概率有所下降。安雪丽等<sup>[26]</sup>研究指出,1990—2000 年河北省农业干旱频率呈上升趋势。车少静等<sup>[27]</sup>指出 1990—1991 年,1994—1996 年河北省雨涝频繁,1997 年全省出现特大干旱,可能是导致 1995—2010 年水旱灾害风险概率上升的原因。

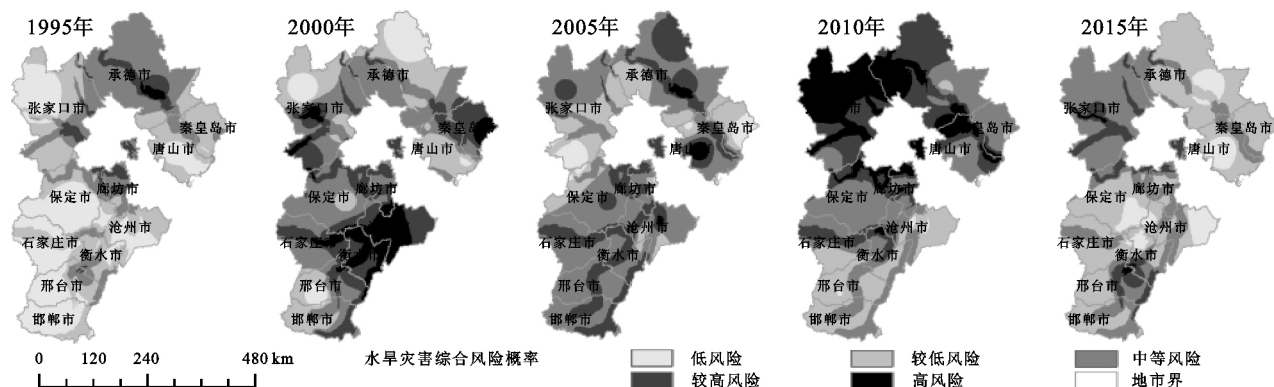


图 1 河北省水旱灾害综合风险概率时空变化

从空间分布上看,北部高原和山地地区水旱灾害风险概率 1995 年以中等风险和低风险为主,2000 年、2005 年风险等级有所上升,以中等风险为主。2010 年该区几乎一半以上地区处于高风险等级,主要分布在张家口市北部及承德市西部,主要因为该时段干旱风险概率较高,2010 年唐山市北部也处于高风险等级,主要因为该时段洪涝风险较高。2015 年北部地区水旱灾害风险等级降低到中等风险以下。

南部地区 1995 年水旱灾害综合风险概率以低风险为主,2000 年沧州市和衡水市转变为高风险等级,主要分布在子牙河、滹沱河及南运河流域,可能因为 1997 年全省出现特大干旱,1998 年夏季中南部干旱严重,1998—2004 年河北省南部旱涝频率较大,导致该区水旱风险较高<sup>[27]</sup>。南部地区水旱灾害风险概率 2005 年以中等和较高风险为主,2010 年风险等级有所下降,以中等风险和较低风险为主,2015 年风险等级进一步下降,以较低风险和低风险为主,保定市南部及沧州市东部均处于低风险等级。

#### 4.2 水旱灾害生态风险时空变化

河北省各年份水旱灾害综合生态风险空间分布见图 2。由图可知,河北省近 20 a 水旱灾害综合

生态风险总体较低,北部、太行山山地等区域多处于低风险和较低风险等级,约占全省面积 57.87%~74.10%,较高风险和高风险约占全省面积 4.9%~20.08%,主要分布在南部平原地区。从时空变化来看,1995—2005 年水旱灾害生态风险空间格局相似,张家口市、承德市、秦皇岛市及太行山山地等区域灾害风险等级均处于低风险和较低风险等级,时空格局变化不大。唐山市、保定市东南部、邯郸市和邢台市水旱灾害生态风险等级从中等风险转变为较高风险及高风险,风险等级呈上升趋势,主要因为该时段水旱灾害风险概率呈上升趋势。石家庄市、衡水市和沧州市水旱灾害生态风险等级变化较小,但均处于较高和高风险等级,且空间分布破碎度较大,表明这些区域易受到水旱灾害影响。2010—2015 年河北省水旱灾害生态风险空间分布格局相似,风险等级与 1995—2005 年相比有所降低,降低区域主要位于南部平原,从中等风险下降到较低风险,可能因为综合社会经济易损度和水旱灾害风险概率下降导致,北部地区生态风险与 2005 年相比,空间格局差异不大。这些结果表明河北省近 20 a 来水旱灾害生态风险总体呈降低趋势。

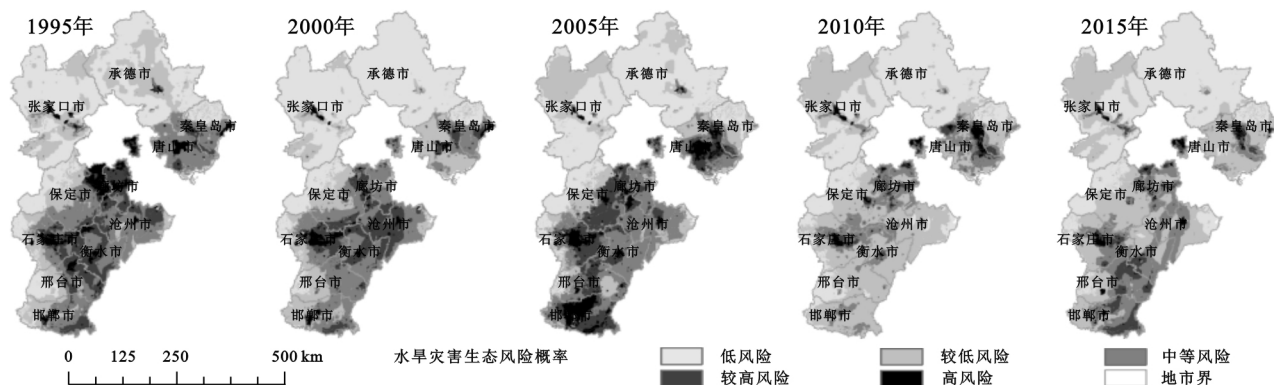


图 2 河北省 1995—2015 年水旱灾害生态风险时空分布

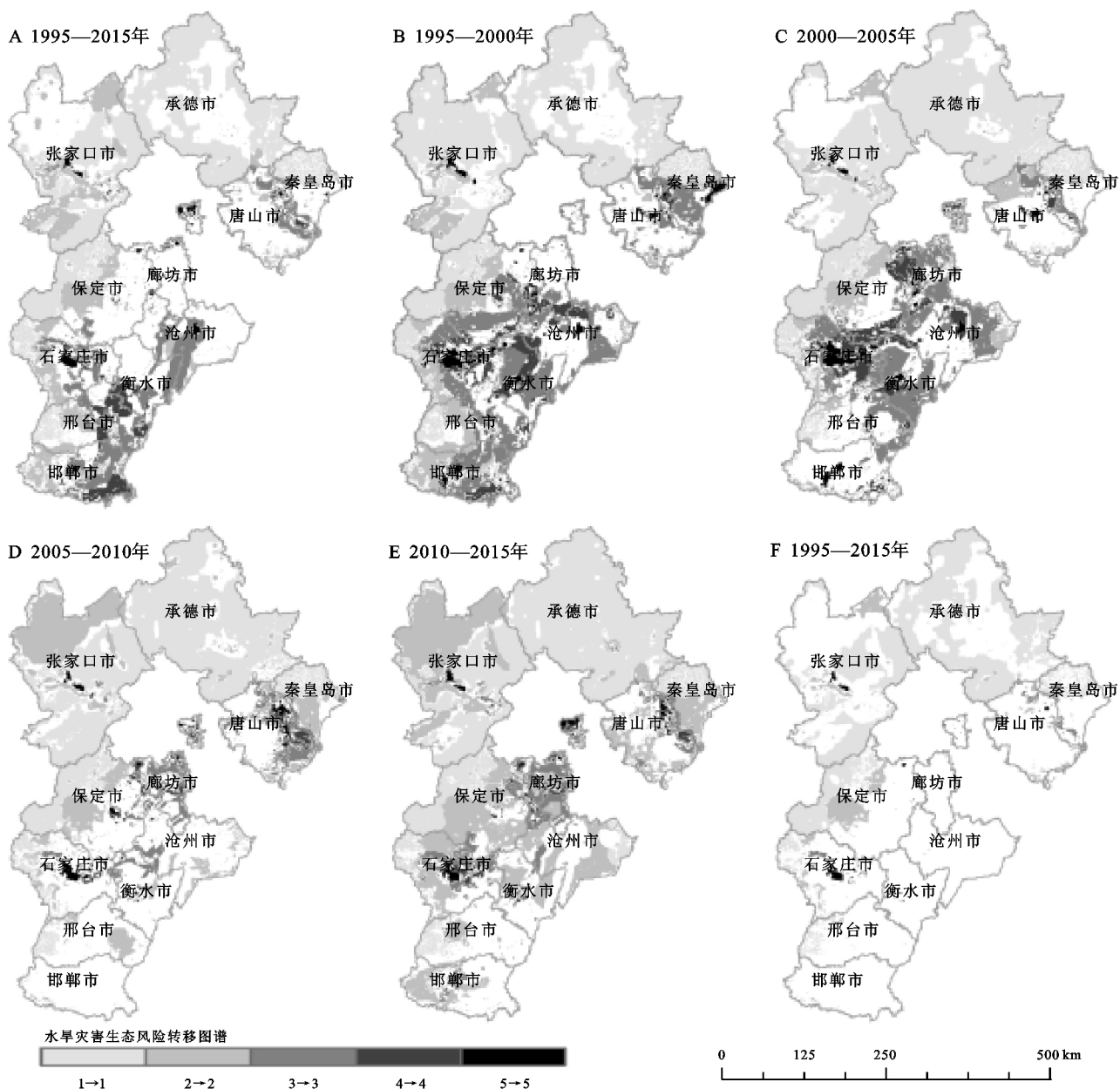
为进一步分析近 20 a 河北省水旱灾害生态风险时空变化情况,基于各年份空间分布图制作水旱灾害

生态风险转移图谱,图 3 表示生态风险未发生等级转换的空间分布图,由图可知,各年份各等级未发生转

变的区域均大于 50%, 其中 2010—2015 年所占比例最高(68.60%, 图 3E), 其次为 1995—2000 年(图 3B) 和 2000—2005 年(图 3C), 分别占全省面积 63.06% 和 60.52%, 北部地区及太行山脉生态风险多处于 1 (低风险)→1, 2(较低风险)→2, 3(中等风险)→3, 而南部则多处于 3→3, 4(较高风险)→4。图 3F 为近 20 a 风险等级从未发生改变的区, 约占全区 28.60%, 以 1→1, 2→2 为主, 主要分布在张家口市东部、承德市西部及保定市东部区域, 风险等级多处于低风险和较低风险等级, 表明这些区域水旱灾害生态风险较低。

图 4 表示发生转变的水旱灾害生态风险等级转移图谱, 近 20 a 河北省水旱灾害生态风险等级以下

降为主(图 4A), 下降面积约占全区 37.70%, 以 2→1, 3→2 为主, 生态系统以森林和草地为主, 主要分布在南部平原区、承德市中部、唐山市及秦皇岛南部等区域。在每 5 a 间隔风险等级转变中, 2005—2010 年风险等级下降面积最多(图 4D), 约占全区总面积 38.56%, 以 3→2, 4→2 为主, 生态系统以农田和水域为主, 主要分布在冀中南地区、唐山市中部、承德市也有零散分布, 可能因为社会经济易损度在此时段有所下降。1995—2000 年风险等级下降面积次之(图 4B), 约占全区总面积 28.58%, 以 2→1, 4→3, 3→2 为主, 主要分布在承德市中部、唐山市、廊坊市及邢台市北部等区域。



注: 图中 1 表示水旱灾害生态风险等级处于低风险等级、2 表示较低风险等级、3 表示中等风险等级、4 表示较高风险等级、5 表示高风险等级, 如 1→1 表示两个间隔年均处于低风险等级。

图 3 河北省 1995—2015 年水旱灾害生态风险未转移空间图谱

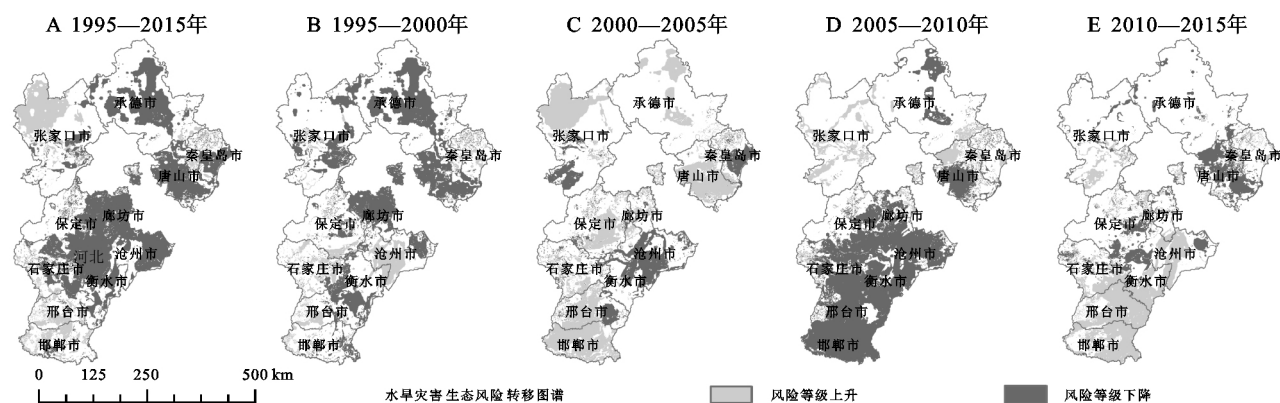


图 4 河北省 1995—2015 年水旱灾害生态风险转移空间图谱

河北省水旱灾害生态风险等级上升的区域与未变化和下降区域相比较少,近 20 a 来约 11.07% 的区域风险等级有所上升(图 4A),以 1→2,2→3 及 3→4 为主,主要分布在张家口坝上地区、冀中南南部等区域,以农田和城镇生态系统为主,主要因为这些区域综合生态损失度较高,表明这些区域生态环境仍需进一步改善。2000—2005 年风险上升区域最多(图 4C),约占全省面积 27.99%,以 1→2,3→4,2→3,2→4 为主,主要分布在张家口市坝上地区、承德市中北部、唐山市中南部、保定市东部、邢台市和邯郸市大部分地区。2010—2015 年风险上升区域面积次之(图 4E),约占全省面积 19.96%,以 2→3,1→2,2→4 及 3→4 为主,主要分布在张家口市南部、冀中南东南部等地区。1995—2000 年(图 4B)和 2005—2010 年(图 4D)这两个时段风险等级上升区域较少(8.36%和 7.72%),以 1→2,3→4,2→3 为主,主要分布在坝上地区、冀中南南部及唐山市北部等地区。

为了查明河北省水旱灾害生态风险的主要贡献因素,将河北省水旱灾害生态风险与干旱、洪涝、综合生态损失度和综合经济易损度这 4 个影响因子进行灰色关联分析<sup>[46]</sup>,得到灰色关联排序为:洪涝风险率排序第 1(0.87)、经济易损度第 2(0.86)、生态损失度第 3(0.77)、干旱风险率第 4(0.67),表明河北省近 20 a 水旱灾害生态风险的降低,主要与洪涝灾害风险率降低有关。使用同样方法对河北省 11 个地市水旱灾害生态风险变化驱动因素进行分析,结果见图 5;总体来说河北省东北部主要受洪涝风险率影响,此外经济易损度也会对生态风险产生影响;西部多数地市受经济影响较多,但其与洪涝风险率和生态损失度相差不大;沧州市受生态损失度影响较多。

## 5 讨论与结论

综上,河北省 1995—2015 年水旱灾害生态风险有所波动,但整体呈下降趋势。高风险区主要分布在南部及城镇区域,这与区域生态环境基础和经济活动直接相关。水旱灾害生态风险以 2005 年为转折年、

2005 年之前整体风险稍高于 2005 年之后,主要原因是 90 年代和 21 世纪初期,由于人类活动加剧,生态环境急剧恶化,旱灾较多,据统计,1991 年 10 月—1993 年 4 月,河北省南部平原地区部分县市持续干旱长达 22 个月,1997 年特大旱灾,全省 122 个县受旱,其中严重干旱县多达 83 个<sup>[47]</sup>。2000 年以后,国家实施了退耕还林还草、调整农牧业产业结构等生态环境恢复与建设措施,使得区域生态环境好转,同时也增加了社会经济抗风险能力,使得 2005 年以后水旱灾害生态风险低于 2005 年,尤其是南部地区。但南部地区 2015 年风险等级与 2010 年相比有所上升,主要因为河北省 2009 年 1 月和 8 月均遭遇重大旱灾<sup>[48]</sup>,致使该区 2015 年生态风险等级有所增加。

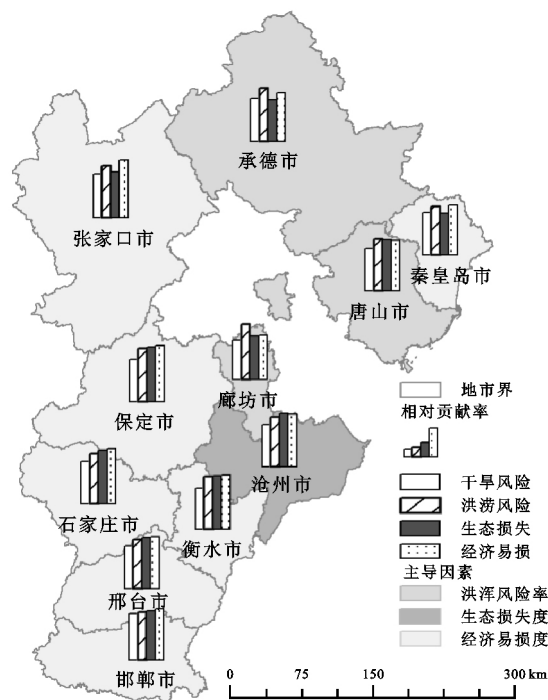


图 5 河北省 1995—2015 年水旱灾害生态风险影响因素分析

河北省近 20 a 来约 57.87%~74.10% 的区域水旱灾害生态风险处于低风险和较低风险等级,约 28.60% 的区域风险等级一直未发生改变,主要位于三北防护林区域。为了改善生态环境,从 70 年代开

始,河北省先后实施了“三北”防护林和京津冀风沙治理等一系列植被恢复工程,北部植被覆盖度增加明显,表明植被恢复工程可减少干旱、风沙危害及水土流失等自然灾害,从而减缓景观生态风险的快速增长。但也有研究指出植被恢复可能会减少区域径流和土壤水分,使土壤湿度下降,在水资源缺乏地区进一步加剧景观生态风险<sup>[49]</sup>。造林树种选取不当或树种单一,可能会造成人工乔木林枯死,同时降低土壤肥力。因此,今后在坝上地区植被恢复工程中应以草地和灌木为主、选取节水效果较好的人工植被物种。

以往文献指出,河北省干旱灾害频繁,但本研究通过分析发现,在长时间尺度,洪涝和经济因素与水旱灾害生态风险关联度较高,主要原因为:(1) 本文在判定洪涝和干旱风险时基于气象数据进行的风险概率分析,未考虑历史洪灾和旱灾;(2) 植被恢复在一定程度上会缓解旱灾和洪涝风险,本研究中洪涝成为主要因素也可能与河北省水利工程标准偏低有关<sup>[47]</sup>;(3) 近20 a 河北省GDP总体呈上升趋势,区域主要经济来源对农业生产依赖降低<sup>[48]</sup>,使经济易损度有所下降,与生态风险趋势一致,导致经济因素与水旱灾害生态风险关联度较高。

本文以RERA理论为基础,基于气温、降雨、地形、土地利用、人口密度和GDP等多源数据,以水旱灾害为风险源,以耕地、林地、草地、水域、建设用地和未利用地6种景观类型为风险受体,分析河北省1995—2015年水旱灾害生态风险时空变化情况。河北省近20 a 水旱灾害生态风险总体风险较低,57.87%以上的区域风险等级处于低风险和较低风险等级,主要位于坝上高原、太行山脉、燕山山脉等地区。从时空变化来看,河北省水旱灾害生态风险总体呈现降低趋势,下降面积约占全区37.70%,降低区域多集中在冀中南北部、承德市中部及唐山市等地区,以较低风险向低风险转变和中等风险向较低风险转变为主。

本研究基于RERA理论从时空变化的角度对河北省水旱灾害生态风险时空变化进行分析,受数据资料限制,研究区气象站点稀少(仅24个气象站点),对降雨和气温的插值分析会在一定程度上影响对水旱风险源的定量描述,在今后研究中可考虑高精度气象再分析数据或遥感反演气象数据,以期提高模型精度。此外,应进一步开发区域生态风险评价的量化指标体系,构建数学或物理模型,使得研究结果更具普适性。

参考文献:

[1] 刘荣花,朱自玺,方文松,等.华北平原冬小麦干旱灾损

风险区划[J].生态学杂志,2006,25(9):1068-1072.

- [2] 刘笑,何学敏,游松财,等.1986—2015年华北平原农业气象灾害的变化特征[J].干旱地区农业研究,2018,36(5):257-263.
- [3] 姜朋举,赵铁松,张静,等.河北省致人死亡的气象灾害时空分布与致灾因子研究[J].防灾科技学院学报,2018,20(3):67-72.
- [4] 孙霞,俞海洋,孙斌,等.河北省主要气象灾害时空变化的统计分析[J].干旱气象,2014,32(3):388-392.
- [5] Stocker T F, Qin D, Plattner G K, et al. Climate change 2013: The physical science basis. contribution of working group I to the fifth assessment report of IPCC the intergovernmental panel on climate change [R]. Cambridge: Cambridge University Press, 2013.
- [6] Landis W G, Wieggers J K. Ten years of the relative risk model and regional scale ecological risk assessment[J]. Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal, 2007,13(1):25-38.
- [7] Fuhrer J, Beniston M, Fischlin A, et al. Climate risks and their impact on agriculture and forests in Switzerland[J]. Climatic Change, 2006,79(1):79-102.
- [8] Trnka M, Semerádová D, Novotný I, et al. Assessing the combined hazards of drought, soil erosion and local flooding on agricultural land: a Czech case study[J]. Climate Research, 2016,70(2):231-249.
- [9] Frolova N L, Kireeva M B, Magrickiy D V, et al. Hydrological hazards in Russia: Origin, classification, changes and risk assessment [J]. Natural Hazards, 2017,88(S1):103-131.
- [10] Madiseh D S, Savary A, Parham H, et al. Determination of the level of contamination in Khuzestan coastal waters(Northern Persian Gulf) by using an ecological risk index[J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2009,159(1):521-530.
- [11] 刘家福,李京,刘荆,等.基于GIS/AHP集成的洪水灾害综合风险评价:以淮河流域为例[J].自然灾害学报,2008,17(6):110-114.
- [12] 蒙古军,周婷,刘洋.区域生态风险评价:以鄂尔多斯市为例[J].北京大学学报:自然科学版,2011,47(5):935-943.
- [13] 张安凝知,赵铁松,陈霞,等.河北省农作物暴雨洪涝灾害的脆弱性评价[J].贵州农业科学,2018,46(5):143-146.
- [14] 李倩,俞海洋,李婷,等.京津冀地区台风危险性评估:基于Gumbel分布的分析[J].地理科学进展,2018,37(7):933-945.
- [15] Guo G, Wu F, He H, et al. Characterizing ecological risk for polycyclic aromatic hydrocarbons in water from Lake Taihu, China[J]. Environmental Monitoring and



- Assessment, 2012, 184(11): 6815-6825.
- [16] 刘世梁, 杨志峰, 崔保山, 等. 道路对景观的影响及其生态风险评价: 以澜沧江流域为例[J]. 生态学杂志, 2005, 24(8): 897-901.
- [17] 李谢辉. 渭河下游河流沿线区域生态风险评价及管理研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2008.
- [18] 许学工, 林辉平, 付在毅, 等. 黄河三角洲湿地区域生态风险评价[J]. 北京大学学报: 自然科学版, 2001, 37(1): 111-120.
- [19] 许学工, 颜磊, 徐丽芬, 等. 中国自然灾害生态风险评价[J]. 北京大学学报: 自然科学版, 2011, 47(5): 901-908.
- [20] 卢宏伟, 曾光明, 谢更新, 等. 洞庭湖流域区域生态风险评价[J]. 生态学报, 2003, 23(12): 2520-2530.
- [21] 贡璐, 鞠强, 潘晓玲, 等. 博斯腾湖区域景观生态风险评价研究[J]. 干旱区资源与环境, 2007, 21(1): 27-31.
- [22] 王晓卿. 20 世纪华北地区的水旱灾害及防救措施研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2005.
- [23] 许月卿, 邵晓梅, 刘劲松, 等. 河北省旱涝灾害及其成因研究[J]. 河北师范大学学报, 2001, 25(1): 124-128.
- [24] 许月卿, 邵晓梅, 刘劲松, 等. 河北省旱涝灾害历史特征研究[J]. 灾害学, 2001, 16(2): 54-58.
- [25] 许月卿, 邵晓梅, 刘劲松, 等. 河北省水旱灾害发生情况统计分析[J]. 国土与自然资源研究, 2001, 23(2): 6-8.
- [26] 安雪丽, 王前锋, 莫新宇, 等. 华北地区农业干旱灾害变化特征[J]. 北京师范大学学报: 自然科学版, 2016, 52(5): 591-596.
- [27] 车少静, 李春强, 申双和, 等. 基于 SPI 的近 41 年 (1965—2005) 河北省旱涝时空特征分析[J]. 中国农业气象, 2010, 31(1): 137-143, 150.
- [28] 邵晓梅, 刘劲松, 许月卿, 等. 河北省旱涝指标的确定及其时空分布特征研究[J]. 自然灾害学报, 2001, 10(4): 133-136.
- [29] 阮新, 刘学锋, 李元华, 等. 河北省近 40 年干旱变化特征分析[J]. 干旱区资源与环境, 2008, 22(1): 50-53.
- [30] 董文, 张新, 陈华斌, 等. 河北省自然灾害危险性分析及在主体功能区划评价中的应用[J]. 自然灾害学报, 2011, 20(3): 99-104.
- [31] 康西言, 李春强, 代立芹, 等. 河北省冬小麦生产干旱风险分析[J]. 干旱地区农业研究, 2012, 30(6): 232-237.
- [32] 廖丹霞, 杨波, 王慧彦, 等. 基于 GIS 的河北省滦县洪水灾害风险评价[J]. 自然灾害学报, 2014, 23(3): 93-100.
- [33] 杨彬云, 吴荣军, 郑有飞, 等. 河北省农业旱灾脆弱性评价[J]. 安徽农业科学, 2008, 36(15): 6499-6502.
- [34] 张欢. 河北省农业旱灾分析及抗旱对策研究[D]. 石家庄: 河北师范大学, 2011.
- [35] 朱卫浩, 陈霞, 邵丽芳, 等. 基于格网的河北省精细化暴雨洪涝灾害风险区划[J]. 中国农学通报, 2016, 32(23): 142-147.
- [36] 张婧, 郝立生, 许晓光, 等. 基于 GIS 技术的河北省洪涝灾害风险区划与分析[J]. 灾害学, 2009, 24(2): 51-56.
- [37] 翟国静. 河北省水旱灾害及防灾减灾对策[J]. 河北水利水电技术, 2002, 26(4): 21-23.
- [38] 王欢. 石家庄市水旱灾害治理与对策研究[D]. 石家庄: 河北师范大学, 2017.
- [39] 邵文婷. 辽西北水旱灾害生态风险评价[D]. 辽宁大连: 辽宁师范大学, 2016.
- [40] 李文龙, 蔡栋, 苏文亮, 等. 基于 SPEI 指数与 GIS 技术的高寒草地干旱生态风险动态评价[J]. 草业科学, 2019, 36(6): 1531-1543.
- [41] Tan C, Yang J, Li M. Temporal-Spatial variation of drought indicated by SPI and SPEI in Ningxia Hui autonomous region, China [J]. Atmosphere, 2015, 6(10): 1399-1421.
- [42] Santiago B, Sergio M V-S. SPEI: Calculation of the Standardized Precipitation-Evapotranspiration Index [EB/OL]. <https://CRAN.R-project.org/package=SPEI>, 2017.
- [43] 李谢辉, 王磊, 苗长虹, 等. 河南省水旱灾害生态风险综合评价[J]. 资源科学, 2013, 35(11): 2308-2317.
- [44] 李谢辉, 李景宜. 基于 GIS 的区域景观生态风险分析: 以渭河下游河流沿线区域为例[J]. 干旱区研究, 2008, 25(6): 899-903.
- [45] He B, Wu J, Lu A, et al. Quantitative assessment and spatial characteristic analysis of agricultural drought risk in China[J]. Natural Hazards, 2013, 66(2): 155-166.
- [46] 刘思峰, 谢乃明. 灰色系统理论及其应用[M]. 8 版. 北京: 科学出版社, 2017: 55-57.
- [47] 刘广才. 河北省干旱成因及抗旱对策分析[J]. 河北水利, 1999, 11(2): 32-33, 52.
- [48] Ye T, Shi P, Wang J A, et al. China's drought disaster risk management: Perspective of severe droughts in 2009—2010[J]. International Journal of Disaster Risk Science, 2012, 3(2): 84-97.
- [49] 傅微, 吕一河, 傅伯杰, 等. 陕北黄土高原典型人类活动影响下景观生态风险评价[J]. 生态与农村环境学报, 2019, 35(3): 290-299.