

谭春萍, 杨建平, 杨圆, 等. 宁夏回族自治区干旱致灾危险性时空变化特征[J]. 灾害学, 2015, 30(2): 89-93. [Tan Chunping, Yang Jianping, Yang Yuan, et al. Spatial-temporal variation of drought hazard in Ningxia Hui Autonomous Region, China [J]. Journal of Catastrophology, 2015, 30(2): 89-93.]

宁夏回族自治区干旱致灾危险性时空变化特征*

谭春萍^{1,2}, 杨建平¹, 杨圆^{1,2}, 陈虹举^{1,2}

(1. 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所 冰冻圈科学国家重点实验室, 甘肃 兰州 730000;
2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 基于宁夏地区 22 个气象站 1971-2011 年月降水量和月平均气温资料, 综合考虑降水和蒸发, 引入标准化降水蒸散指数(SPEI), 分析该地区气象干旱变化情况, 并在此基础上通过构建 SPEI 值与干旱等级的加权综合评价模型, 评估该地区干旱致灾危险性, 剖析其时空变化特征。结果表明: 宁夏地区气象干旱呈显著加重趋势, 年均 SPEI 值 1972-2011 年以 $0.37 \cdot (10a)^{-1}$ 的速率显著减小; 该地区气象干旱呈现自南向北逐渐加重的空间分布格局, 且干旱加重速度呈现由中部干旱带向南北分别递增的空间变化特征。1972-2011 年, 宁夏地区干旱致灾危险性呈显著增大趋势, 干旱致灾危险性指数近 40 年减小速率为 $0.12 \cdot (10a)^{-1}$; 该地区干旱致灾危险性在空间分布上表现为北部引黄灌区高于中南部地区, 且危险性的增速呈现中部较缓、南北较快的空间变化特征。

关键词: 干旱; 致灾危险性; 时空变化; 标准化降水蒸散指数(SPEI); 综合评价模型; Mann-Kendall 趋势法; 宁夏

中图分类号: X43 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-811X(2015)02-0089-05

doi: 10.3969/j.issn.1000-811X.2015.02.017

干旱是最严重、最复杂的气象灾害之一, 对我国生态环境、农业生产、粮食安全、经济发展及社会稳定均已产生了严重影响^[1-4]。根据灾害系统与灾害风险理论, 灾害系统由孕灾环境、致灾因子和承灾体共同组成^[5], 而自然灾害风险是致灾因子危险性、承灾体暴露性和脆弱性、防灾减灾能力综合作用的结果^[6]。致灾因子危险性是灾害风险产生的直接诱因, 因此定量评估致灾危险性大小, 详细分析其变化规律是风险评估及风险管理研究的基础。

目前, 针对干旱或旱灾致灾危险性已有部分研究。王静爱等选取灾害频数为指标, 基于县域统计单元探讨了中国水旱灾害危险性的时空分异规律^[7]; 杜晓燕等以降水距平百分率为样本, 运用信息扩散理论等方法评价了天津地区旱涝灾害危险性^[8]; 李谢辉等结合发生旱灾的历史灾年频率和降水量距平百分率, 利用 GIS 技术从时空尺度上分析了河南省干旱灾害危险性^[9]; 王杰等运用信息扩散理论, 结合降水距平百分率和干旱危险度等级, 对四川省夏季农业干旱危险性的空间分布进行了探讨^[10]; 贺山峰等以地表湿润指数为指标, 采用 PRECIS 模式模拟的气候情景数据, 预估了 SRES B2 情景下西南地区未来干旱致灾危险性的时空格局^[11]。上述研究多以降水距平百分率为指标入手进行探讨与分析, 该指标仅考虑了降水因素, 而蒸发等因素对干旱的发生与演进起着重要作用, 因此干旱(或旱灾)致灾危险性的研究,

也应将其纳入考虑, 以便更好地反映实际情况。

宁夏回族自治区(以下简称宁夏地区)长期遭受干旱的威胁, 是中国受旱率和成灾率最严重的省份之一^[12]。目前关于宁夏地区干旱的研究主要是基于气温、降水等要素, 通过标准化降水指数(SPI)和距平百分率(Pa)等干旱指标分析该地区干旱的时空演变特征^[13-17], 而涉及干旱(或旱灾)危险性的研究尚少。李红英等采用降水距平百分率, 结合干旱发生频次(概率)与界限强度指数评价了宁夏全区干旱致灾因子危险性, 发现危险性自南向北大致呈逐步增加趋势^[18]; 王连喜等采用标准化降水指数(SPI), 结合干旱强度等级与发生频率, 运用加权求和评价模型评估了宁夏干旱灾害的危险性, 发现该地区农业干旱危险度在空间上呈现显著的东北-西南分异, 中西部和北部地区相对较高, 而中东部和南部地区相对较低^[19]。以上研究所采用干旱指标(降水距平百分率和标准化降水指数), 均只考虑了降水因素, 而宁夏地区属于典型的干旱、半干旱地区, 蒸发对该地区干旱的发生与演变具有十分重要的影响, 因此只考虑降水因素的干旱危险性难以全面反映宁夏地区的实际情况, 同时现有研究仅简要分析了干旱危险性的总体空间分布规律与差异, 有待进一步拓展与细化。

本文综合考虑降水和蒸发, 引入标准化降水蒸散指数(SPEI), 分析宁夏地区气象干旱的时空

* 收稿日期: 2014-08-22 修回日期: 2014-10-16

基金项目: 国家重大科学研究计划项目(2012CB955404)

作者简介: 谭春萍(1983-), 女, 四川宜宾人, 博士研究生, 主要从事气候变化及灾害的影响、风险与适应研究。E-mail: tanchunping@lzb.ac.cn

变化,并在此基础上,结合 *SPEI* 值与干旱等级,运用加权综合评价模型,评估干旱致灾危险性,详细分析其时空变化特征,以为该地区干旱灾害风险评估、风险管理及区域可持续发展规划提供科学依据。

1 数据与方法

1.1 研究区概况

宁夏回族自治区(35°14' ~ 39°23' N, 104°17' ~ 107°39' E)(图1)地处我国西北干旱区、青藏高原区和东部季风区三大自然区域的交汇地带^[20],总体呈现南高北低、山地迭起、平原错落的格局。由于其深居内陆,属典型的干旱、半干旱地区,干旱少雨、蒸发强烈,生态环境尤为脆弱^[16,21]。

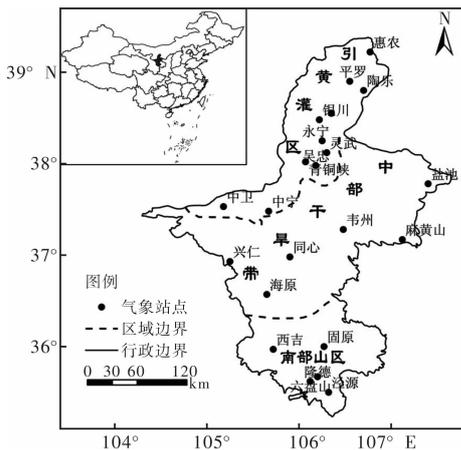


图1 宁夏分区与气象站点分布示意图

根据气候条件、生态环境状况、农牧业分布和传统的习惯,通常把宁夏划分为3个区域(图1):引黄灌区,年降水量为200 mm左右;中部干旱带,年降水量在200 ~ 400 mm之间;南部山区,年降水量达400 mm以上^[22-23]。

1.2 数据来源及处理

文中选用宁夏地区22个气象站(图1)逐月降水量和平均气温资料,作为 *SPEI* 指数的输入资料,时间跨度为1971年1月至2011年12月,来源于宁夏回族自治区气象局。数据经过严格的质量检验,个别月份缺失数据采用均值法进行插补订正。

文中自北向南选取引黄灌区、中部干旱带和南部山区3个区域(图1),分析宁夏地区 *SPEI* 指数和干旱致灾危险性指数的时空变化规律。引黄灌区,包括惠农、平罗、陶乐、贺兰、银川、永宁、灵武、青铜峡、吴忠、中卫和中宁等11站;中部干旱带,包括兴仁、盐池、韦州、麻黄山、同心和海原等6站;南部山区,包括固原、西吉、六盘山、隆德和涇源等5站。以宁夏全区所有站点相应要素的算术平均值为整个地区的表征值,各子区域的数据处理方式与之相同。

1.3 研究方法

1.3.1 标准化降水蒸散指数(*SPEI*)的计算及干旱等级划分

SPEI 指数由 Vicente-Serrano 提出,以月降水量和月平均气温为输入参数,根据 Thornthwait 方法^[24]计算潜在蒸发量(*PET*),利用月降水和潜在蒸发量(*PET*)的差值进行正态标准化处理而得,其

计算原理和步骤与 *SPI* 相似,详细计算过程见文献^[25],文中不再赘述。*SPEI* 计算程序软件来自 <http://digital.csic.es/handle/10261/10002>。由于 *SPEI* 与 *SPI* 计算原理相似,故 *SPEI* 采用与 *SPI* 一致的等级划分标准,见表1^[26-27]。

表1 基于 *SPEI* 的干旱等级划分标准^[26-27]

等级	类型	<i>SPEI</i>
0	无旱	$0 \leq SPEI$
1	轻微干旱	$-1.0 < SPEI < 0$
2	中度干旱	$-1.5 < SPEI \leq -1.0$
3	重度干旱	$-2.0 < SPEI \leq -1.5$
4	极端干旱	$SPEI \leq -2.0$

1.3.2 干旱致灾危险性评价方法

文中以 *SPEI* 为指标评价干旱致灾危险性,据表1中的干旱等级,将轻微干旱、中度干旱、重度干旱和极端干旱的权重值按1:2:3:4的比例进行归一化,构建干旱致灾危险性综合评价模型,其计算公式为:

$$H_{Di} = \sum_{j=1}^n (M_{ij} \times W_j) \quad (1)$$

式中: H_{Di} 为干旱致灾危险性指数,值越小,危险性越大; i 代表年份, j 代表干旱等级的序号; M_{ij} 为 i 年份中处于干旱等级 j 的所有月的 *SPEI* 均值; W_j 为干旱等级 j 的权重; n 为轻微干旱及其以上强度的干旱等级总数。若某一年中12个月均未出现 *SPEI* 小于0(即无干旱),则此年干旱致灾危险性指数表示为零。

1.3.3 趋势检验方法

Mann-Kendall 检验法(简称 M-K 检验)是一种基于秩的非参数统计检验方法,是检验序列变化趋势及诊断序列突变发生的有效工具之一,已被广泛应用于水文、气象序列分析^[28-30]。该方法的优点在于不受少数异常值和样本分布的影响。文中使用该方法分析宁夏地区 *SPEI* 指数和干旱致灾危险性指数的变化趋势。M-K 检验之趋势分析与线性趋势倾向度的非参数估算原理及过程见文献^[29-30],文中不再赘述。

2 结果与分析

2.1 年均 *SPEI* 时空变化

由于 *SPEI* 具有多时间尺度特性,其中3个月和6个月尺度的 *SPEI* 值可反映季节性的干湿变化,而12个月尺度的 *SPEI* 值则能反映干湿的年际变化^[31],因此文中选用12个月时间尺度的 *SPEI* 来分析宁夏及各区域气象干旱的年际变化特征。以宁夏地区22个气象站点的月降水量和月平均气温作为输入资料,运用 *SPEI* 计算程序软件计算得到各站点12个月时间尺度的 *SPEI* 时间序列,再通过计算相应站点的算术平均值求得宁夏全区及各区域的 *SPEI* 时间序列。

图2显示,1972-2011年,宁夏地区年均 *SPEI* 值在波动中逐渐减小,减速为 $0.37 \cdot (10 \text{ a})^{-1}$,通过了0.01的显著性水平。由表1可知, *SPEI* 值越小,则干旱程度越严重; *SPEI* 值呈减小趋势,则干旱程度呈加重趋势,反之亦然。由此表明,宁夏地区气象干旱近40年呈显著加重趋势。

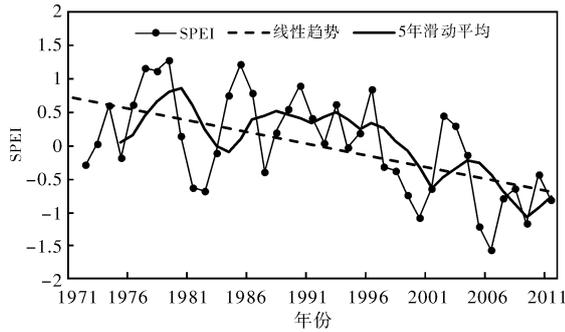
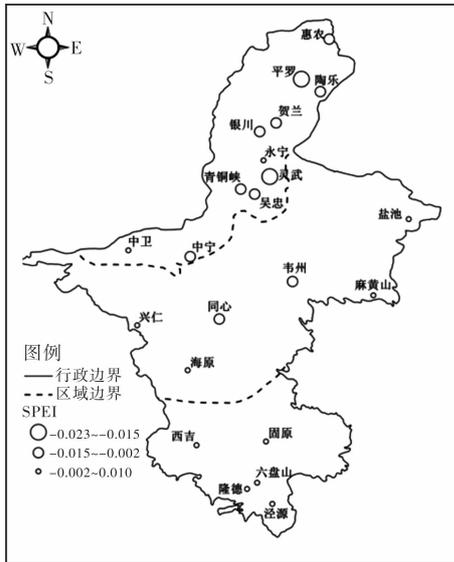
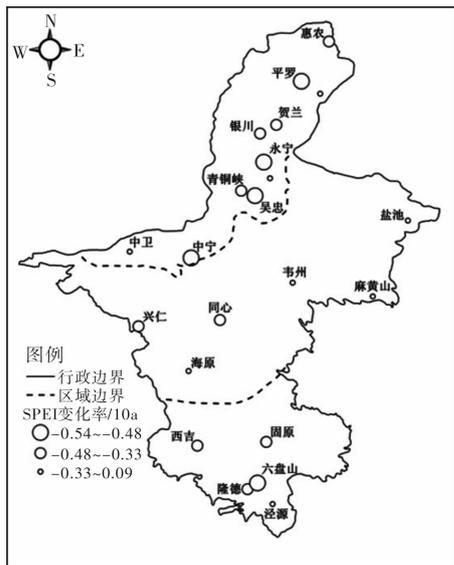


图2 宁夏地区 1972-2011 年 12 个月尺度 SPEI 变化



(a) 多年平均年 SPEI



(b) 年 SPEI 变化率

图3 宁夏各站点 1972-2011 年多年平均年 SPEI 及变化率空间分布图

宁夏地区干旱存在明显的空间差异。图 3a 为宁夏地区 22 个站点 1972-2011 多年平均年 SPEI 的空间分布情况, 图中利用 ArcGIS 中的自然断点法将所有站点多年平均年 SPEI 值从小到大分为 3 个等级, 从 1 到 3 级, SPEI 值逐渐增大, 而干旱程度逐渐减轻。由图 3a 可以看出, 多年平均年

SPEI 值引黄灌区总体较小, 11 站中属于 1~2 级的有 9 站, 占 81.8%, 其中平罗最小, 为 -0.023; 中部干旱带 SPEI 值总体较大, 6 站中, 仅同心和韦州 2 站 SPEI 属于 2 级, 占 33.3%, 而其余 4 站 SPEI 均属于 3 级; 而南部山区 SPEI 值总体最大, 5 站均属于 3 级水平, 其中六盘山最大, 多年平均 SPEI 值为 0.01。可见, 宁夏地区气象干旱北部引黄灌区最严重, 其次是中部干旱带, 南部山区最轻, 由此表明该地区气象干旱呈现自南向北加重的空间分布格局。

近 40 年, 宁夏地区各区域干旱均呈显著加重趋势, 但空间差异显著。由图 3b 可看出, 宁夏地区所有站点 1972-2011 年 SPEI 均呈减小趋势, 表明宁夏全区气象干旱均呈加重趋势。利用 ArcGIS 中的自然断点法将所有站 1972-2011 年 SPEI 年变化率从小到大分为 3 个等级, 从 1 到 3 级, SPEI 减小速率逐渐减小, 而干旱加重速度逐渐减慢。引黄灌区、中部干旱带和南部山区年 SPEI 减速属于 1~2 级的站点数分别为 8 站、2 站和 4 站, 分别占各区域站点总数的 72.8%、33.3% 和 80.0%, 三个区域年 SPEI 近 40 年总体减速自北向南依次为 $0.41 \cdot (10a)^{-1}$ 、 $0.27 \cdot (10a)^{-1}$ 和 $0.38 \cdot (10a)^{-1}$, 均通过了 0.05 的显著性水平。可见, 引黄灌区年 SPEI 减速最大, 其次是南部山区, 而中部干旱带最小。由此表明, 宁夏地区干旱加重速度呈现由中部向南北分别加快的空间变化特征。

2.2 干旱致灾危险性时空变化

以 12 个月时间尺度的 SPEI 值为指标, 利用式 (1) 计算得到各气象站点的干旱致灾危险性指数时间序列, 再通过计算相应站点的算术平均值求得宁夏全区及各区域的危险性指数时间序列。

图 4 显示, 1972-2011 年, 宁夏地区干旱致灾危险性指数在波动中逐渐减小, 减速为 $0.12 \cdot (10a)^{-1}$, 通过了 0.01 的显著性水平。由表 1 和式 (1) 可知, 危险性指数减小, 则说明干旱致灾危险性在增大, 由此表明宁夏地区干旱致灾危险性呈显著增大趋势。

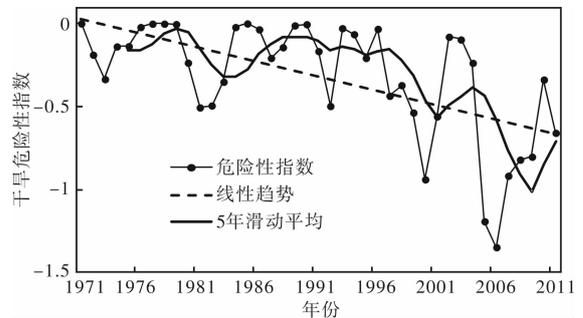


图4 宁夏地区 1972-2011 年干旱危险性变化

宁夏地区干旱致灾危险性存在明显的空间分布差异(见图 5a)。采用 ArcGIS 中的自然断点法将所有站多年平均干旱致灾危险性指数从小到大分为 3 个等级, 从 1 到 3 级, 干旱致灾危险性指数逐渐增大, 而干旱危险性程度逐渐减小。引黄灌区、中部干旱带和南部山区干旱致灾危险性指数属于 1~2 级的站点数分别有 9 站、4 站和 4 站, 分别占各区域站点总数的 81.8%、66.7% 和 80.0%, 三个区域平均干旱致灾危险性指数自北向南依次为 -0.332、-0.323 和 -0.329。可见, 宁夏地区干

旱致灾危险性指数, 北部引黄灌区最小, 其次是南部山区, 而中部干旱带最大, 由此表明该地区旱致灾危险性呈现北部高于中南部地区的空间分布格局。

慢, 由此表明该地区干旱危险性加重速度在空间上呈现中部相对较缓, 而南北相对较快的空间变化特征。

3 结论与讨论

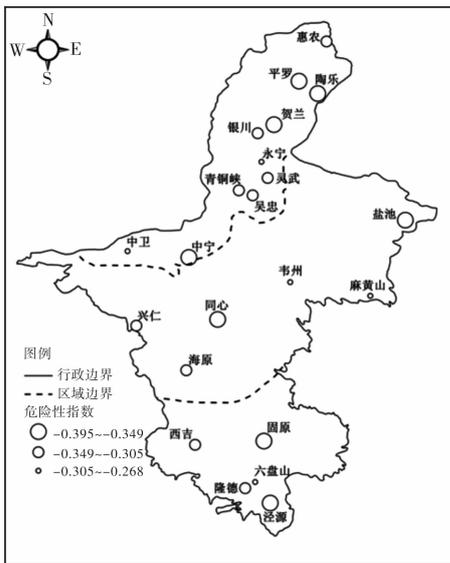
本文基于月降水量和月平均气温资料, 引入标准化降水蒸散指数(SPEI), 分析了宁夏地区气象干旱的时空变化特征, 并通过 SPEI 值与干旱等级权重构建加权综合评价模型, 对该地区干旱致灾危险性的时空变化进行研究, 得到以下主要结论。

(1) 1972 - 2011 年, 宁夏地区气象干旱呈显著加重趋势, 年均 SPEI 值以 $0.37 \cdot (10a)^{-1}$ 的速率显著减小。空间上, 该地区气象干旱呈现自南向北加重的空间分布格局; 三个区域干旱程度近 40 年均呈显著加重趋势, 其加重速度呈现由中部干旱带向北部引黄灌区和南部山区分别加快的空间变化特征。

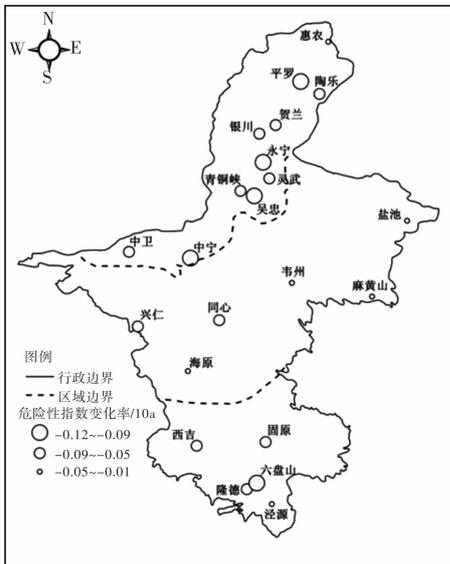
(2) 宁夏地区干旱致灾危险性呈显著增大趋势, 干旱致灾危险性指数 1972 - 2011 年以 $0.12 \cdot (10a)^{-1}$ 的速率减小。空间上, 该地区北部引黄灌区干旱致灾危险性高于中部干旱带和南部山区; 三个区域干旱致灾危险性近 40 年均呈显著增大趋势, 其增速呈现出与该地区气象干旱程度一致的空间变化特征, 即: 中部增速相对较缓、而南北相对较快。

作者在前人研究的基础上, 引入新的气象干旱指标 SPEI, 补充考虑了蒸发对宁夏地区干旱发生及演进的作用, 能更好地反映当地干旱变化的实际情况。已有研究采用干旱发生频次(频率)与干旱强度等级相结合, 探讨了宁夏地区 1961 - 2010 年^[18] 和 1979 - 2008 年^[19] 两个时段内多年平均状态下干旱危险性的空间分布格局与规律, 而在风险评估与管理过程中, 除需了解致灾因子危险性的空间分布差异外, 还应把握其时空变化规律。鉴于此, 文中借助 SPEI 值与干旱强度等级, 构建加权综合评价模型, 实现了对该地区干旱致灾危险性时间上的动态变化与空间上的变化差异进行探讨与分析。

上述研究结果显示, 宁夏地区气象干旱近 40 年呈显著加重趋势, 这与已有研究采用降水距平百分率^[13]、Z 指数^[32] 和标准化降水指数^[17] 为指标分析所得的干旱变化趋势一致; 该地区干旱程度在空间分布上呈自南向北加重, 这是由该地区降水量自南向北减少和气温自南向北升高^[33] 综合作用所致。宁夏地区干旱致灾危险性近 40 年呈显著增大趋势, 与气象干旱程度的变化一致, 是由该地区近 40 年来气温持续快速上升和降水量减少^[33] 共同作用的结果; 该地区干旱致灾危险性在空间分布格局上, 表现为北部引黄灌区高于中部干旱带和南部山区, 已有研究显示 1961 - 2010 年宁夏干旱致灾因子危险性大致呈自南向北逐步增加趋势^[18], 1979 - 2008 年该地区农业干旱危险度大致呈东北 - 西南分异^[19], 由此表明, 宁夏地区干旱危险性总体呈现北部高于中南部地区的空间分布格局这一结果是基本一致的。而该地区中部与南部干旱危险性在空间分布规律上的分析结果存在差异, 这可能与选用干旱指标、危险性评价模型



(a) 多年平均危险性指数



(b) 危险性指数变化率

图5 宁夏各站点 1972 - 2011 年多年平均干旱致灾危险性指数及变化率空间分布图

近 40 年, 宁夏地区各区域干旱致灾危险性均呈显著增大趋势, 但空间差异显著(图 5b)。采用 ArcGIS 中的自然断点法将所有站点的干旱致灾危险性指数变化速率从小到大分为 3 个等级, 从 1 到 3 级, 干旱致灾危险性指数减小速率逐渐减小, 则干旱危险性加重速度亦逐渐减小。引黄灌区、中部干旱带和南部山区干旱致灾危险性指数减速属于 1 ~ 2 级的站点数分别为 10 站、2 站和 4 站, 分别占各区域站点总数的 90.9%、33.3% 和 80.0%, 三个区域 1972 - 2011 年干旱致灾危险性指数减速自北向南依次为 $0.12 \cdot (10a)^{-1}$ 、 $0.07 \cdot (10a)^{-1}$ 和 $0.10 \cdot (10a)^{-1}$, 均通过了 0.05 的显著性水平。可见, 宁夏地区干旱致灾危险性指数减小速度, 引黄灌区最快, 其次是南部山区, 中部干旱带最

的构建方法以及评价结果空间表达方式的不同具有一定关系。宁夏地区干旱致灾危险性在空间变化上表现为中部干旱带增速相对较缓、而北部引黄灌区和南部山区相对较快, 这与该地区气象干旱程度的空间变化一致, 由于宁夏地区气温显著变暖是宁夏地区旱灾加重的主要气候因素^[33], 因此该地区干旱危险性的这种空间变化差异主要是由中部升温相对较缓、而南北升温较快所致。

致谢: 文中所用气象资料由宁夏回族自治区气象局杨兴国研究员提供, 在此表示诚挚感谢! 感谢徐国保和龙银平博士在数据处理过程中给予技术支持与帮助!

参考文献:

- [1] 程曼, 王让会, 薛红喜, 等. 干旱对我国西北地区生态系统净初级生产力的影响[J]. 干旱区资源与环境, 2012, 26(6): 1-7.
- [2] 徐联. 干旱对我国农业的影响及应对措施[J]. 广东农业科学, 2011, (12): 201-203.
- [3] 温奇, 李苓苓, 马玉玲, 等. 旱灾遥感预警监测评估技术—以 2011 年长江中下游旱灾为例[J]. 灾害学, 2013, 28(2): 51-54.
- [4] 万金红, 李云鹏, 贾慧聰. 农户系统旱灾恢复性研究综述[J]. 灾害学, 2014, 29(4): 136-142.
- [5] 史培军. 论灾害研究的理论与实践[J]. 南京大学学报: 自然科学版, 1991(11): 37-42.
- [6] 孙仲益, 张继权, 严登华, 等. 基于 GIS 的安徽省旱灾风险空间演变研究[J]. 东北师大学报: 自然科学版, 2012, 44(4): 133-137.
- [7] 王静爱, 毛佳, 贾慧聰. 中国水旱灾害危险性的时空格局研究[J]. 自然灾害学报, 2008, 17(1): 115-121.
- [8] 杜晓燕, 黄少樑. 天津地区旱涝灾害危险性评价及区划研究[J]. 防灾科技学院学报, 2011, 13(1): 75-81.
- [9] 李谢辉, 王磊. 河南省历史水旱灾害危险性分析[J]. 资源科学, 2012, 34(8): 1526-1532.
- [10] 王杰, 倪长健, 姚鹏, 等. 近 30 年四川省夏季农业干旱危险性空间分布特征分析[J]. 自然灾害学报, 2013, 22(5): 247-253.
- [11] 贺山峰, 葛全胜, 吴绍洪, 等. SRES B2 情景下西南地区干旱致灾危险性时空格局预估[J]. 中国人口·资源与环境, 2013, 23(9): 165-171.
- [12] 黄会平. 1949-2007 年我国干旱灾害特征及成因分析[J]. 冰川冻土, 2010, 32(4): 659-665.
- [13] 马力文, 李凤霞, 梁旭. 宁夏干旱及其对农业生产的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2001, 19(4): 102-109.
- [14] 冯建民, 梁旭, 张智. 宁夏旱涝灾害动态监测指标及其应用[J]. 干旱区资源与环境, 2003, 17(6): 71-77.
- [15] 梁旭, 冯建民, 张智, 等. 宁夏干旱气候气候变化及其成因研究[J]. 干旱区资源与环境, 2007, 21(8): 68-74.
- [16] 杨建玲, 冯建民, 郑广芬, 等. 宁夏中南部地区干旱变化趋势分析[J]. 中国沙漠, 2012, 32(3): 842-851.
- [17] 李双双, 延军平, 杨蓉, 等. 气候变暖背景下 1961-2010 年宁夏旱涝灾害空间分布特征和变化规律[J]. 中国沙漠, 2013, 33(5): 1552-1559.
- [18] 李红英, 张晓煜, 袁海燕, 等. 宁夏农业干旱灾害综合风险分析[J]. 中国沙漠, 2013, 33(3): 882-887.
- [19] 王连喜, 孟丹, 耿秀华, 等. 基于 GIS 的宁夏农业干旱风险评价与区划[J]. 自然灾害学报, 2013, 22(5): 213-220.
- [20] 张子龙, 陈兴鹏, 逯承鹏, 等. 宁夏城市化与经济增强的环境压力互动关系的动态计量分析[J]. 自然资源学报, 2011, 26(1): 22-33.
- [21] 陈晓光, Conway D, 陈晓娟, 等. 1961-2005 年宁夏极端降水事件变化趋势分析[J]. 气候变化研究进展, 2008, 4(3): 156-160.
- [22] 郑广芬, 陈晓光, 孙银川, 等. 宁夏气温、降水、蒸发的变化及其对气候变暖的响应[J]. 气象科学, 2006, 26(4): 412-421.
- [23] 李欣, 王连喜, 李琪, 等. 宁夏近 25 年植被指数变化及其与气候的关系[J]. 干旱区资源与环境, 2011, 25(9): 161-166.
- [24] Thornthwaite C W. An approach toward a rational classification of climate. Geographical Review, 1948, 38: 55-94.
- [25] Vicente-Serrano S M, Beguería S, López-Moreno J I. A multiscale drought index sensitive to global warming: The standardized precipitation evapotranspiration index [J]. Journal of Climate, 2010, 23(7): 1696-1718.
- [26] McKee T B, Doesken N J, Kleist J. The Relationship of drought frequency and duration to time scales [C]//Proceedings of the Eighth Conference on Applied Climatology, Boston. Washington, D. C.: American Meteorological Society, 1993, 179-184.
- [27] Banimahd S A, Khalili D. 2013. Factors influencing markov chains predictability characteristics, utilizing SPI, RDI, EDI and SPEI drought indices in different climatic zones. Water Resources Management, 2013, 27: 3911-3928.
- [28] Zhang Q, Liu C L, Xu C Y, et al. Observed trends of annual maximum water level and streamflow during past 130 years in the Yangtze River basin, China [J]. Journal of Hydrology, 2006, 324: 255-265.
- [29] Kumar S, Merwade V, Kam J, et al. Streamflow trends in India: Effects of long term persistence, precipitation and subsurface drains. Journal of Hydrology, 2009, 374: 171-183.
- [30] Sicard P, Mangin A, Hebel P, et al. Detection and estimation trends linked to air quality and mortality on French Riviera over the 1990-2005 period [J]. Science of the Total Environment, 2010, 408: 1943-1950.
- [31] 陈子葵, 黄强, 刘曾美. 1962-2007 年广东干湿时空变化特征分析[J]. 水科学进展, 2013, 24(4): 469-476.
- [32] 纳丽, 郑广芬, 任少云, 许建秋. 宁夏春、夏、秋季干旱与降水集中期及集中度的关系[J]. 冰川冻土, 2013, 35(4): 1015-1021.
- [33] 谭春萍, 杨建平, 秦大河, 等. 宁夏回族自治区持续性旱灾的气候背景[J]. 中国沙漠, 2014, 34(2): 518-526.

Spatial-temporal Variation of Drought Hazard in Ningxia Hui Autonomous Region, China

Tan Chunping^{1,2}, Yang Jianping¹, Yang Yuan^{1,2} and Chen Hongju^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Cryosphere Sciences, Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Based on the monthly precipitation and monthly mean air temperature of 22 meteorological stations from 1971 to 2011 in Ningxia, the Standardized Precipitation Evapotranspiration Index (SPEI) is used to analyze the spatial and temporal evolutions of the meteorological drought, and the drought hazard is evaluated by the weighted comprehensive evaluation model involved SPEI value and drought grade. The results show that the drought displayed a significant aggravation tendency in Ningxia from 1972 to 2011, with a rate of annual SPEI decrease by $0.37 \cdot (10a)^{-1}$. In Ningxia, the drought spatially showed an increasing trend from the south to the north, and the drought aggravation speed had a particular spatial pattern, increased northward and southward from the Central arid zone. The drought hazard showed a significant increasing trend during 1972-2011, with a rate of annual drought hazard index decrease by $0.12 \cdot (10a)^{-1}$. The drought hazard in the Yellow river irrigation area was higher than that in the Central arid zone and the Southern mountain region, and the increasing speed of drought hazard also increased northward and southward from the Central arid zone.

Key words: drought; disaster risk; temporal and spatial variation; the Standardized Precipitation Evapotranspiration Index (SPEI); comprehensive evaluation model; Mann-Kendall trend method; Ningxia