

基于信息分配和扩散理论的东北地区 干旱脆弱性特征分析*

王文祥 左冬冬 封国林[†]

(扬州大学物理科学与技术学院, 扬州 225000)

(2014年6月7日收到; 2014年7月6日收到修改稿)

基于信息分配和扩散理论, 结合标准化降水指数和东北三省(黑龙江、吉林、辽宁)旱灾灾损指数, 综合考虑了气象因子与社会因子, 分析了我国东北三省1971—2012年的干旱脆弱性特征, 并进一步计算了我国东北三省的干旱风险。使用信息分配方法估计干旱强度概率分布, 采用二维正态信息扩散方法构造了干旱强度与旱灾灾损的脆弱性关系, 将干旱强度的概率分布与脆弱性折线相乘求和(离散分布)或积分(连续分布)即可得到多年平均风险。研究表明, 针对灾损的小样本事件引入信息分配和扩散方法对小样本数据进行分析, 获取的干旱强度概率分布比简单直方图法所得更加平滑, 而以事件为因、灾损为果得到干旱强度-旱灾灾损的脆弱性关系, 物理意义明确, 所得脆弱性关系折线也比较符合实际情况, 并且不同样本长度所得结果相近, 对样本长度不敏感, 较好地克服了小样本分析的不稳定性。

关键词: 信息分配和扩散理论, 标准化降水指数, 脆弱性, 风险

PACS: 92.40.De

DOI: 10.7498/aps.63.229201

1 引言

干旱是我国最常见、影响最大的气候灾害之一, 我国每年因干旱造成的粮食减产约占气象灾害粮食总损失的50%以上^[1]。干旱具有持续时间长、影响范围广、且影响范围会随着持续时间的增长而进一步扩大等特征。进入21世纪以来, 全球干旱频繁发生^[2], 越来越多的学者从干旱成因^[1,3]、干旱指数定义^[4–8]、干旱特征演化^[9–18]以及干旱所造成的影响^[19–21]等方面来研究干旱事件。目前的分析大都针对气象要素本身, 或者某地区的灾损情况, 并未较好地给出气象要素-灾损情况之间的关系, 即干旱-旱灾的脆弱性关系。基于此, 本文试图构建干旱-旱灾的脆弱性曲线来分析气象要素与灾损情况之间的关系。

众所周知, 在进行风险分析时, 脆弱性的研究显得尤为重要^[22–26], 尤其在最近发布的IPCC(政

府间气候变化专门委员会)第五次评估报告中, 其第二工作组将脆弱性连同影响性、适应性作为其报告的核心内容^[27]。“脆弱性”这一概念的优点主要体现在其能整合多重压力(物理学上将垂直施加在物体上的外力称为压力, 此处可理解为作用在承受体上的风险源)、各种风险承受体(承受体包含面广, 而承灾体是承受体的一个个例, 指代灾害风险下的承受体)和时空尺度; 当在复杂水平上开展脆弱性的具体研究时, 已有研究虽然提出了层次分析、加权处理等方法来研究脆弱性, 但对“脆弱性”进行实际量化操作依然比较困难^[28–30]。导致这一问题的原因可能在于人们过分注重“脆弱性”概念本身, 而在研究过程中对细节性的问题却无法给出十分客观的解释。如分析东北地区低温-玉米产量的脆弱性关系时, 不同生长发育时段、玉米种类、地形情况等对温度的响应并不相同, 在实际研究中很难将这些细节问题一一考虑在内。因此已有研究仅给出了

* 国家自然科学基金(批准号: 41305056, 41175067)和国家重点基础研究发展计划项目(批准号: 2012CB955901)资助的课题。

† 通讯作者。E-mail: fenggl@cma.gov.cn

一些主观性的方法,如系统调查法^[31]等。有鉴于此,黄崇福等^[32,33]提出信息分配和扩散法,并以此研究了年降雨量极值-受灾人口比例的脆弱性,同时也有学者将此方法应用于地震风险分析^[34]等方面。信息分配和扩散方法对于小样本风险分析有较好的优势。信息分配方法实际上是传统直方图法计算样本概率的优化,将直方图的边界模糊化处理,使得过渡边界的信息得以利用,因而针对小样本概率估算更为合理^[32];而信息扩散方法则是基于分子扩散理论,将样本信息进行正态化扩散,在一定程度上解决了小样本容量不足的问题。本文基于信息分配和扩散法,将气象要素即干旱强度指数视为风险源,灾损情况视为风险结果,二者之间的关系则可定义为承灾体的脆弱性函数,以此来分析我国东北地区的干旱脆弱性特征。

本文主要从以下四个部分进行展开:1)首先用灾损匹配事件以确定干旱指数的致灾阈值,继而根据信息分配和扩散方法研究干旱强度-旱灾受灾/成灾的脆弱性关系;2)根据风险模型分析了东北地区的旱灾风险;3)针对不同样本长度进行分析,证明信息分配和扩散理论分析小样本数据的适用性;4)结论以及提出可能优化本文研究方法的思路。

2 资料和方法

2.1 资料

本文所用社会因子数据为我国东北地区黑龙江、吉林和辽宁三省近42年来旱灾的受灾面积、成灾面积以及农作物总播种面积,数据来自于中国种植业信息网^[35],时间跨度为1971—2012年分年记,空间上以省为单位;气象数据为我国东北地区135个站的逐月降水数据,时间跨度为1961年1月—2012年12月,数据来自于中国气象局国家气象信息中心。其中黑龙江省49站,吉林省40站,辽宁省46站,站点空间分布如图1所示。

2.2 方法

2.2.1 区域干旱及旱灾指标

本文所用干旱指标为标准化降水指数(stan-dardized precipitation index, SPI),该指数是由McKee等^[36,37]发展的基于降水量的干旱指数,也是气象干旱指标的一个代表,其计算思路是将降

水量进行标准化处理,具体算法在文献[9,16]都有具体说明。一般情况下有六种尺度: SPI1, SPI3, SPI6, SPI9, SPI12 和 SPI24。SPI1 即是以1个月的降水量作为一个样本来计算; SPI3 即是以连续三个月的降水量作为样本来计算,如计算1971年9月的SPI3指数时,计算过程中以7—9三个月的总降水量作为降水样本;以此类推SPI6, SPI9等指数的计算方法。因而可以计算出东北地区所有站点的不同时间尺度的SPI值。为了保证与旱灾受灾指数在时间上对应,仅考虑1971年1月—2012年12月的SPI值。

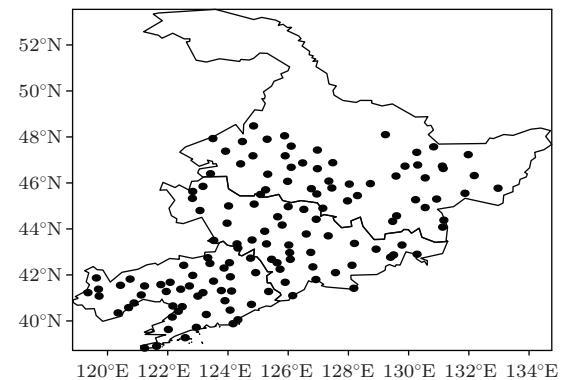


图1 东北三省 SPI 指数站点分布情况

SPI指数所具有的一个典型优点是其可反映不同时间尺度的干旱^[38],而分析干旱和旱灾的过程中对时间尺度的选择尤其重要,因此本文选用SPI指数来代表气象干旱指标。由于不确定在何种尺度上干旱和旱灾对应较好,因此本文在研究时将月尺度及月以上尺度的SPI指数均考虑在内,并从中挑选出与旱灾对应较好的时间尺度进行进一步研究。

考虑到各省站点分布相对比较密集,因此根据(1)式分别对各省的所有站点进行区域平均,计算结果作为该省的整体干旱指标,即区域干旱指标:

$$X = \sum_{i=1}^n x_i/n, \quad (1)$$

其中 x_i 为该省各个站点某一尺度的SPI指数, n 为该省所包含的站点数。

旱灾指标的定义为年受灾/成灾面积与农作物总播种面积的比值,计算公式为

$$I_i = S_i/D_i, \quad (2)$$

其中 I_i 表示受灾/成灾百分率,单位为%; S_i 表示第*i*年的旱灾受灾/成灾面积, D_i 表示同年的农作物总播种面积,其单位均为万亩。旱灾受灾面积指因

干旱作物减产幅度超过正常产量 10% 的播种面积; 旱灾成灾面积则是指在受灾面积中, 因干旱作物减产幅度超过正常产量 30% 的播种面积. 以 I_i 作为衡量灾害程度的标准, I_i 越大, 表明该年所受到的旱灾越严重, 反之亦然.

2.2.2 信息分配及扩散方法

信息分配和扩散方法的提出, 是在处理小样本数据时, 由于其所包含的信息不完备, 不足以精确地认识样本应遵循的统计规律而延伸出来的数学处理方法^[32]. 信息分配方法是将传统直方图法在分析小样本概率事件过程时的明确边界模糊化, 从而使得模糊过渡信息得以使用; 信息扩散方法则是

$$q_{ij} = \begin{cases} \left(1 - \frac{|x_i - u_j|}{\Delta}\right), & |x_i - u_j| \leq \Delta \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, m. \quad (4)$$

令

$$Q_j = \sum_{i=1}^n q_{ij}, \quad (5)$$

可得到控制点 u_j 上的全部分配信息 Q_j , 依次计算每个控制点所得的分配信息, 可得 X 在控制点空间 U 上的原始信息分布, 即软频率直方图(软频率直方图指频率直方图更加平滑).

$$p_j = \frac{Q_j}{n}, \quad (6)$$

即可得到各个控制点空间的概率分布:

$$\begin{aligned} P &= \{p(u_1), p(u_2), p(u_3), \dots, p(u_m)\} \\ &= \{p_1, p_2, p_3, \dots, p_m\}. \end{aligned} \quad (7)$$

2) 二维信息扩散法. 在二维情况下, 假设 W 为气象要素 x 和社会经济要素 y 的数据集, 其因果关系有:

$$W = \{(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_n, y_n)\}. \quad (8)$$

根据需求选取步长 Δ_x 和 Δ_y , 分别可生成输入和输出的监控空间:

$$\begin{aligned} U &= \{u_1, u_2, \dots, u_m\}, \\ V &= \{v_1, v_2, \dots, v_t\}. \end{aligned} \quad (9)$$

由二维正态扩散公式(10), 可将 W 中样本点 (x_i, y_i) 携带的信息按量 μ_{ij} 分配给 U 和 V 中的点 (u_j, v_k) . 对于样本集合 X 中的任一样本 (x_i, y_i) , 利用正态分布规律扩散到输入和输出论域 U, V .

$$\mu_{ijk} = \frac{1}{2\pi h_x h_y}$$

基于分子扩散理论演化而来, 将样本进行正态扩散从而获取足够多的样本容量进行研究. 具体算法如下.

1) 信息分配法. 设定, 计算样本为 n 年的观测数据 $X = \{x_1, x_2, x_3, \dots, x_n\}$, 根据样本容量和样本中的最大值和最小值, 选取适当的步长 Δ , 生成与样本相对应的控制点空间 U :

$$U = \{u_1, u_2, u_3, \dots, u_m\}. \quad (3)$$

由一维线性信息分配公式(4), 即可将 X 中的样本点 x_i 所携带的信息按量 q_{ij} 分配到其所对应的控制点空间 u_j 中:

$$\times \exp \left[-\frac{(u_j - x_i)^2}{2h_x^2} - \frac{(v_k - y_i)^2}{2h_y^2} \right], \quad (10)$$

其中扩散系数 h 可由扩散系数公式(11)来确定:

$$h = \begin{cases} 0.8146(b-a) & n = 5 \\ 0.5690(b-a) & n = 6 \\ 0.4560(b-a) & n = 7 \\ 0.3860(b-a) & n = 8 \\ 0.3362(b-a) & n = 9 \\ 0.2986(b-a) & n = 10 \\ 2.6851(b-a)/(n-1) & n \geq 11 \end{cases}, \quad (11)$$

其中 $b = \max_{1 \leq i \leq n}(x_i)$, $a = \min_{1 \leq i \leq n}(x_i)$. 同一维信息分配理论相似, 令

$$Q_{jk} = \sum_{i=1}^n \mu_{ijk}. \quad (12)$$

由(8—12)式可计算得到 W 在 $U \times V$ 上的原始信息矩阵 Q . 类似一维情况, 对 Q 中各列进行归一化处理, 生成模糊关系 R , 其物理意义是表征气象要素同灾损之间的模糊关系. 依据模糊近似推理模型, 可进一步通过输入自变量 x_0 生成对应的输出因变量 y_0 , 从而生成脆弱性函数.

$$Q = \begin{Bmatrix} Q_{11} & \cdots & Q_{1t} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ Q_{m1} & \cdots & Q_{mt} \end{Bmatrix}. \quad (13)$$

归一化处理:

$$\begin{cases} \mathbf{R} = \{r_{jk}\}_{m \times t} \\ r_{jk} = Q_{jk}/s_k \\ s_k = \max_{1 \leq j \leq m} Q_{jk} \end{cases}, \quad (14)$$

得到模糊关系 \mathbf{R} , 模糊信息矩阵 \mathbf{R} 即为本文所构建风险模型. 继而根据不同的输入自变量得到相应的输出因变量. 如输入量为确定值 x_0 , 则可根据(15)式得到相应的模糊集 \tilde{x}_0 :

$$\mu_{x_0}(u_j) = \begin{cases} 1 - |x_0 - u_j|/\Delta, & |x_0 - u_j| \leq \Delta \\ 0, & \text{其他} \end{cases}, \quad (15)$$

其中 $\Delta = u_{j+1} - u_j$. 将模糊集与模糊矩阵叉乘即可得到对应的输出模糊集 \tilde{y}_0 :

$$\mu_{y_0}(v_k) = \sum_{1 \leq j \leq m} \mu_{x_0}(u_j) \times r_{jk} \quad k = 1, 2, \dots, t. \quad (16)$$

将模糊集 \tilde{y}_0 代入重心法(17)式中即可将其非模糊化为一个确定的值 y_0 :

$$y_0 = \frac{\sum_{1 \leq k \leq t} \mu_{y_0}(v_k) \times v_k}{\sum_{1 \leq k \leq t} \mu_{y_0}(v_k)}. \quad (17)$$

经过信息分配与二维扩散将原始小样本数据构建为可反映其因果关系的模糊矩阵, 进而代入不同的自变量获得其所对应的因变量, 使得分析小样本之间的因果关系变得更为精确, 在一定程度上解决了样本不足的问题.

2.2.3 脆弱性及风险

在进行风险分析时, 比较常见的一个基本模式是: $R = H \circ D$ ^[39], 其中 R 是风险, H 是描述风险源的函数族, D 是描述风险承受体的脆弱性函数族. 而“ \circ ”是合成规则族, 其最简单的一个定义是计算概率密度函数和剂量-反应曲线围成的面积^[40], 当所分析风险的内涵为损失期望值时, 描述它的指标体系由“损失” D 和“概率” H 两个指标组成, “ \circ ”表示乘法运算.

图2为风险分析的一个简单模型^[41], 分别由致灾因子概率密度和剂量-反应曲线组成, 其中间所围面积即为其风险值, 可以用如下函数表示:

$$R = \int p(x) \cdot f(x) dx, \quad (18)$$

其中 $p(x)$ 为致灾因子概率密度函数, $f(x)$ 为剂量-反应函数. 当其概率分布离散时则可以表示为

$$R = \sum_{i=1}^n p(u_i) \cdot f(u_i). \quad (19)$$

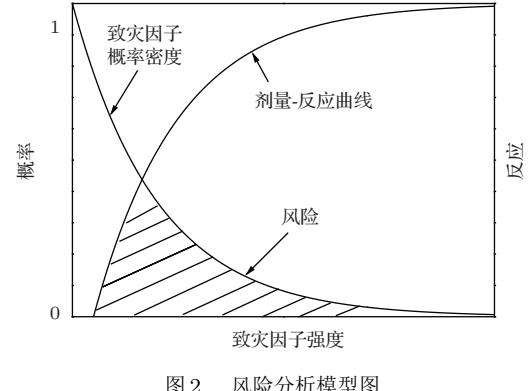


图2 风险分析模型图

3 结果与分析

3.1 干旱强度与旱灾程度的相关性分析

SPI指数的旱涝等级划分规则如表1所示^[36,41]. 其等级划分是基于SPI指数的概率密度而来, 类似于极端事件阈值的定义^[42], 并给出了干旱强度和干旱历时. 干旱强度定义可由(20)式得到

$$Q = - \sum_{i=1}^D X_i, \quad (20)$$

其中 D 为该年 SPI 指数低于阈值 S 的月份即该年的干旱时长, X 为区域干旱指标((1)式), 不同程度干旱阈值的范围如表1所示. 然而这种干旱等级的定义仅考虑了气象要素, 并未将实际的灾害损失考虑在内, 因而本文根据灾损匹配事件的方法重新定义干旱指标的阈值. 定义方法如下: 分别计算 $S = [-2.0, -0.1, 0.1]$ 时所得干旱时长和干旱强度与灾损结果的相关, 定义相关系数最大时对应的 S 为致灾阈值.

表1 SPI值对应的干旱级别

干旱级别	轻旱	中旱	重旱	特旱
SPI值	[-0.99, 0]	[-1.00, -1.49]	[-1.50, -1.99]	[≤ -2.00]

图3为黑龙江省干旱时长、干旱强度与旱灾受灾率/成灾率的相关。图中横坐标 S 表示阈值，纵坐标表示相关系数，虚线表示0.05的信度，实线表示0.01的信度。由图3(a), (c)可知，干旱时长与受灾率及成灾率的相关系数波动较大，而干旱强度与受灾率及成灾率的相关系数波动较小，因干旱强度是SPI指数小于其阈值 S 的累加((20)式所示)，因此干旱强度 Q 在一定程度上也反映了干旱时长，故本文工作选用干旱强度作为气象干旱的表征指标。由图3(b), (d)可知，不同时间尺度SPI指数得到的干旱强度均随 S 减小而先略微增大再迅速减小，如图3(b)所示，当 $S = [-1.0, -0.1]$ 时，SPI3, SPI6和SPI9指数所对应的相关系数较大。同样地，计算了吉林省和辽宁省不同时间尺度SPI指数得到的干旱强度与旱灾受灾/成灾率的相关性(图略)，均出现SPI3, SPI6和SPI9指数所对应的相关系数较大，故本文在之后分析干旱和旱灾之间的关系时采

用SPI3, SPI6和SPI9指数所对应的干旱强度来进行研究。

如前所述，根据不同地区的干旱强度与该地区旱灾受灾/成灾的相关性来定义不同于传统意义上的干旱致灾阈值，如表2所示。表中 S_0 对应受灾时的阈值因此称之为受灾阈值， S_1 对应成灾时的阈值，因此称之为成灾阈值，二者均属于致灾阈值，只是程度不同。虽然在 S 取值大于-0.5时，干旱强度与旱灾的受灾/成灾的相关均能通过0.01的信度检验(图3(b), (d)所示)，但是其相关系数最大仅有0.6左右，而且整个计算序列的时间长度只有42 a，加之相同等级的干旱对于各个地区的影响也不同，因此干旱强度与旱灾受灾/成灾率的关系并不能用简单的回归等方法来分析，而应该用非线性分析方法来分析[32,43-45]。基于此，本文通过信息分配和扩散方法分析干旱强度与旱灾受灾/成灾率之间的脆弱性关系。

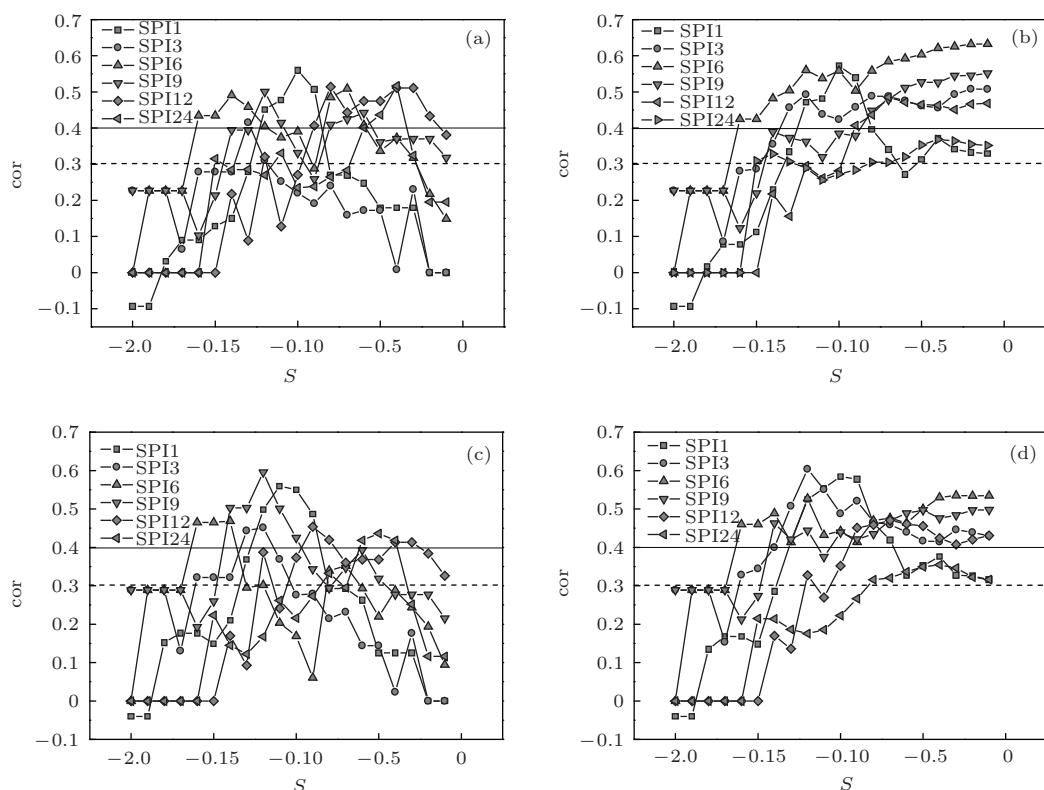


图3 黑龙江省干旱时长、干旱强度与旱灾受灾率/成灾率相关 (a) 干旱时长与受灾率相关系数; (b) 干旱强度与受灾率相关系数; (c) 干旱时长与成灾率相关系数; (d) 干旱强度与成灾率相关系数

表2 东北三省不同尺度干旱指数与受灾/成灾相关最大对应的阈值

地区	黑龙江			吉林			辽宁		
	SPI3	SPI6	SPI9	SPI3	SPI6	SPI9	SPI3	SPI6	SPI9
S_0	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.9	-1.1	-0.1
S_1	-1.2	-1.2	-0.1	-0.1	-0.1	-0.4	-0.9	-0.2	-0.1

3.2 东北地区干旱强度-旱灾受灾/成灾的脆弱性关系

根据表2所定义的受灾、成灾阈值,再由干旱强度计算公式((20)式)分别可得东北三省各省1971—2012年的逐年干旱强度,以此来构建东北地区干旱强度-旱灾受灾/成灾的脆弱性关系。

以黑龙江省为例,选取SPI3指数来构建干旱强度-旱灾受灾的脆弱性关系。则有受灾阈值为-0.1(表2)。根据(20)式得到1971—2012年42年的逐年干旱强度:

$$\begin{aligned} Q &= \{q_1, q_2, \dots, q_{42}\} \\ &= \{1.813, 2.915, \dots, 1.897\}, \end{aligned}$$

其大小范围为[0.426, 7.497],根据直方图法计算其概率,首先根据直方图的渐近优化区间数m的求解公式(21),计算构建直方图时应划分区间个数,

$$m = 1.87(n - 1)^{2/5}, \quad (21)$$

式中n为样本长度,即为42,由此确定构建直方图的区间个数为9,由于区间是等间距划分,因此可以得到各个区间的长度 $\Delta = (q_{\max} - q_{\min})/n = 0.785$,将其作为(3)式的控制空间步长。为使直方图边界模糊化,将黑龙江省42 a的干旱强度由低到高排序,分别在其两端各加上一个控制点,此时所构建软直方图的起点为0,间隔为0.785,终点为8.635,再根据(4)—(7)式即可得到干旱强度的控制点频率,频率在某种情况下可近似看作概率:

$$\begin{aligned} P &= \{p(u_1), p(u_2), p(u_3), \dots, p(u_{11})\} \\ &= \{0.03, 0.144, 0.231, \dots, 0.001\}. \quad (22) \end{aligned}$$

至于信息扩散时监控空间的个数,理论上讲越多越好,然而经过多次尝试发现,40个监控空间计算结果与60,80监控空间计算结果相差不多,后者的计算量反而多,因此本文设定监控空间为40个,因而共有41个监控点,其区间步长计算与信息分配时相似,故此处不多做说明。旱灾受灾率的监控点数应当与干旱强度的监控空间点数保持一致,也为41个。继而根据(8)—(13)式即可得到干旱强度-受灾率的信息矩阵 $Q_{U \times V}$,其反映了干旱强度与旱灾受灾率的因果关系。根据(14)式对 $Q_{U \times V}$ 进行归一化处理,得到归一化的信息矩阵 $R_{U \times V}$,将(22)式中的 $u_i, i = 1, 2, \dots, 11$ 作为输入值,代入(15)—(17)式即可获得相应的输出结

果 $y_i, i = 1, 2, \dots, 11$,此处输入值即为干旱强度值,输出值即为受灾率。如对黑龙江省而言,在SPI3指数下的第一个输入值为0.012(即将黑龙江省SPI3指数下所得1971—2012年42 a的干旱强度由低到高排序,其最小值减去其步长 $\Delta/2$),代入(15)—(17)式,可得相应的输出值为0.078。由此类推得到11个离散点,将其连线定义为干旱强度-旱灾受灾率的脆弱性折线。根据此方法分别对东北三省计算,结果如图4所示。

图4为东北三省在不同时间尺度下的干旱强度-受灾率脆弱性折线图。图中横坐标表示干旱强度,纵坐标表示旱灾受灾率,计算时间区间为1971—2012年。由图4可知,东北三省的旱灾受灾率均随着干旱强度的增加而增加,局部出现小幅波动;随着干旱强度持续增强,由于播种面积的稳定不变以及人们可能会采取一些措施来抵制旱灾的蔓延,因此旱灾受灾比例不再有明显变化,甚至由于人们采取的抗旱措施使得受灾比例略微有所下降,比较符合实际情况。因此,用干旱强度-受灾率脆弱性折线来解释东北三省受到旱灾脆弱性的变化是较为合理的,同时气象数据是可预测的,将其代入信息矩阵 $R_{U \times V}$ 中即可得到与该气象条件相对应的旱灾受灾率,在一定程度上可以作为年景预估。

同样地,也可根据成灾率得到相应成灾情况。图5为东北三省干旱强度-成灾率脆弱性折线图,横坐标表示干旱强度,纵坐标表示成灾率,计算的时间区间为1971—2012年。由图5可以看出,各省的成灾率明显低于受灾率;各省的脆弱性折线图与图4中的变化相似,均呈现出成灾率先随着干旱强度的增加慢慢增大,到达一定程度后则开始减小或者趋于稳定的演变规律。这些均与实际情况相符合,因而用该方法分析东北地区黑龙江、吉林和辽宁省的干旱脆弱性是比较准确的。

3.3 区域干旱风险分析

将第二节中风险值计算公式(19)应用于本文即有,

$$R = \sum_{i=1}^{11} P(u_i) \cdot F(u_i), \quad (23)$$

其中 $P(u_i)$ 为干旱强度的概率,可由(20)式得到; $F(u_i)$ 即为干旱强度-旱灾灾损的脆弱性关系。

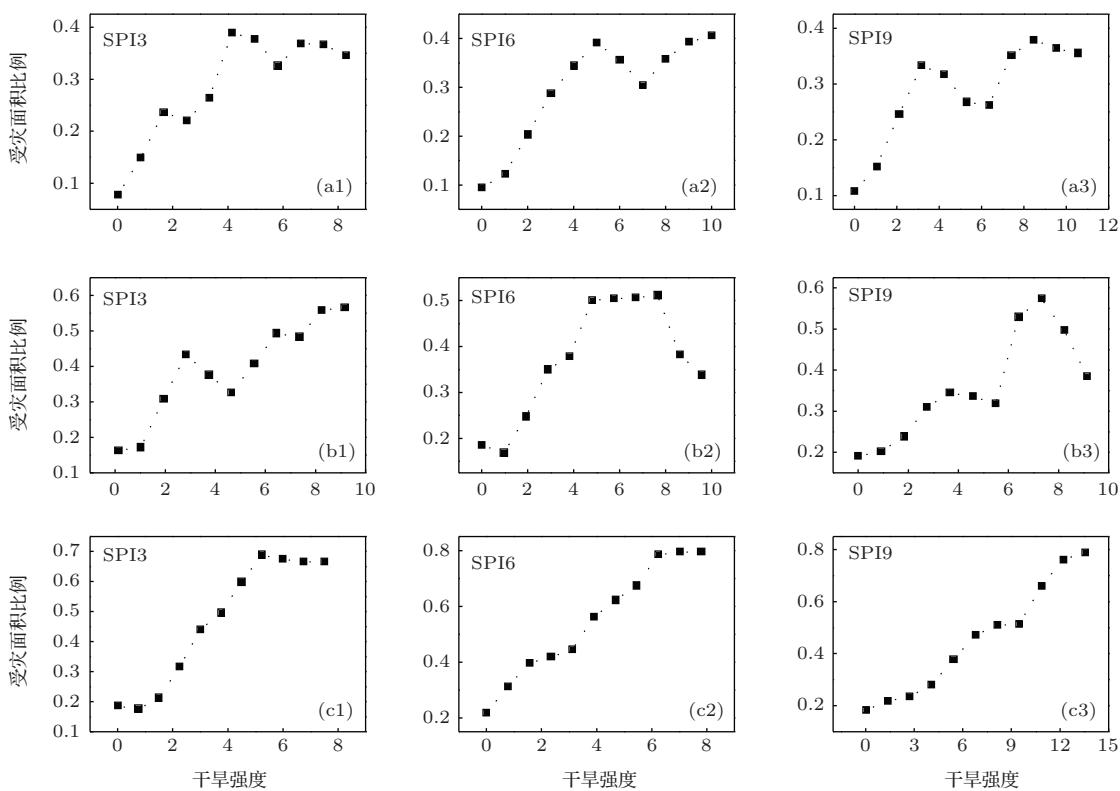


图4 东北三省在不同时间尺度下干旱强度-受灾率脆弱性折线图 (a1), (a2), (a3) 分别代表黑龙江省 SPI3, SPI6, SPI9 指数对应的脆弱性折线图; (b1), (b2), (b3) 分别代表吉林省 SPI3, SPI6, SPI9 指数对应的脆弱性折线图; (c1), (c2), (c3) 分别代表辽宁省 SPI3, SPI6, SPI9 指数对应的脆弱性折线图

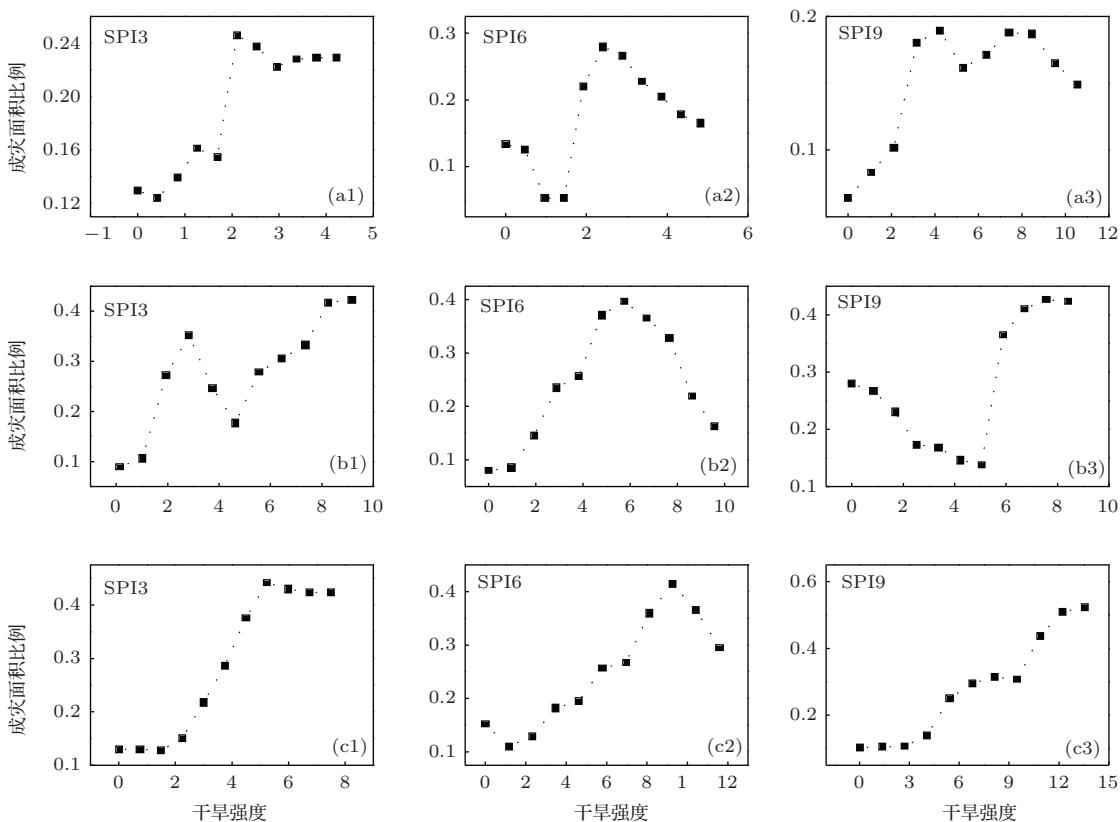


图5 东北三省干旱强度-成灾率脆弱性折线图 (a1), (a2), (a3) 分别代表黑龙江省 SPI3, SPI6, SPI9 指数对应的脆弱性折线图; (b1), (b2), (b3) 分别代表吉林省 SPI3, SPI6, SPI9 指数对应的脆弱性折线图; (c1), (c2), (c3) 分别代表辽宁省 SPI3, SPI6, SPI9 指数对应的脆弱性折线图

表 3 东北三省的旱灾受灾/成灾风险

地区	黑龙江			吉林			辽宁		
	SPI3	SPI6	SPI9	SPI3	SPI6	SPI9	SPI3	SPI6	SPI9
R_0	0.256	0.246	0.242	0.348	0.326	0.308	0.304	0.304	0.317
R_1	0.146	0.133	0.128	0.250	0.214	0.252	0.184	0.195	0.1829

表 3 为东北三省在不同时间尺度 SPI 指数下所得旱灾风险, 其中 R_0 表示干旱强度所对应的受灾风险, R_1 表示干旱强度所对应的成灾风险, 其值由(23)式确定, 式中 $P(u_i)$ 则由(20)式确定, $F(u_i)$ 即为 3.2 节中的输出值 $y_i, i = 1, 2, \dots, 11$. 此处风险可理解为该区域受到该种灾害损失的百分比. 由表 3 可以看出, 基于不同时间尺度的 SPI 指数所得到的风险值有一定的差异, 但总体差异不大. 由表 4 可以看出, 就不同时间尺度 SPI 指数对应结果的平均情况而言, 黑龙江省、辽宁省和吉林省的旱灾受灾/成灾的风险依次增加; 就 42 a 平均的平均情况而言, 黑龙江省、辽宁省、吉林省的受灾风险依次为 25%, 31.4%, 33.6%, 风险比较高.

表 4 东北三省旱灾受灾/成灾平均风险

地区	黑龙江	吉林	辽宁
\bar{R}_0	0.250	0.336	0.314
\bar{R}_1	0.135	0.234	0.190

3.4 不同样本长度影响分析

除了进行风险分析, 还可根据干旱强度-受灾/成灾率脆弱性折线图所表征的干旱强度与灾损之间的脆弱性关系, 即信息矩阵 $\mathbf{R}_{U \times V}$ ((13), (14) 式), 通过改变样本长度来计算实际干旱强度对应的输出的模拟灾损结果与实际灾损情况的对比, 即样本长度影响分析. 考虑到样本容量的局限性, 因此采用以 30 a 为最长时间长度 (1971—2000 年), 基于此 30 a 长度的样本根据 2.2.2 节中(3)—(4)式, 构建脆弱性信息矩阵 \mathbf{Q} , 再将 1971—2012 年的干旱指数代入, 根据(15)—(17)式即可得到基于 30 a 样本长度得模拟结果; 再将之后的 12 a (2001—2012 年)逐年添加到计算样本中去, 即可得到不同样本长度相应的模拟结果, 如图 6 所示.

图 6 为模拟灾损结果与实际灾损情况对比, 计算区域为吉林省. 横坐标表示时间, 纵坐标表示受灾率, 黑色曲线为实际受灾率, 其余 13 条曲线分别为样本长度为 30 a (即 1971—2000 年),

31 a (1971—2001 年), \dots , 42 a (1971—2012 年) 所构建脆弱性关系的模拟受灾率. 图 6(a1), (a2), (a3) 分别表示 SPI3, SPI6, SPI9 指数的模拟结果; 图 6(b1), (b2), (b3) 分别表示 SPI3, SPI6, SPI9 指数下实际灾损与模拟结果的差值. 图 6(b1), (b2), (b3) 中的 13 条曲线几乎汇聚成了一条曲线, 变化特征比较一致, 这表明信息分配和扩散方法对于小样本容量的分析具有一定的可靠性, 对于同一个区域而言, 其本身所受到的灾害也符合一定的规律.

从图 6(a1), (a2), (a3) 还能看出, 模拟结果更加趋向于平均, 这是因为模型构建实际是基于概率分布来实现的, 而且所用二维正态信息扩散函数在计算时视原始信息呈对称分布, 然而在实际情况下信息分布并不一定是对称的, 因此模拟结果波动趋向于平衡的位置, 即平均值.

4 结 论

本文主要根据干旱强度指数和旱灾灾损指数对我国东北地区黑龙江、吉林和辽宁三省进行了干旱脆弱性特征分析. 首先以灾损匹配灾害事件得到不同时间尺度下的致灾阈值, 更加符合灾害分析的一般思路; 继而针对灾损的小样本事件引入信息分配和扩散方法对小样本数据进行分析, 获取的干旱强度概率分布比简单直方图法所得结果更加平滑, 东北三省的旱灾受灾率均随着干旱强度的增加而增加, 局部出现小幅波动; 随着干旱强度持续增强, 由于播种面积的稳定性以及抗旱措施的实施, 旱灾受灾比例不再有明显变化, 甚至由于人们采取的抗旱措施使得受灾比例略微有所下降, 比较符合实际情况. 说明以事件为因、灾损为果得到干旱强度-旱灾灾损的脆弱性关系, 物理意义明确, 所得脆弱性关系折线也比较符合实际情况. 继而根据风险公式分析了我国东北地区辽宁、吉林和黑龙江三省 1971—2012 年的旱灾风险, 结果表明吉林省的旱灾风险最大, 约为 0.34; 辽宁省次之, 约为 0.31; 黑龙江省最小, 为 0.25. 最后针对不同样本长度进行分

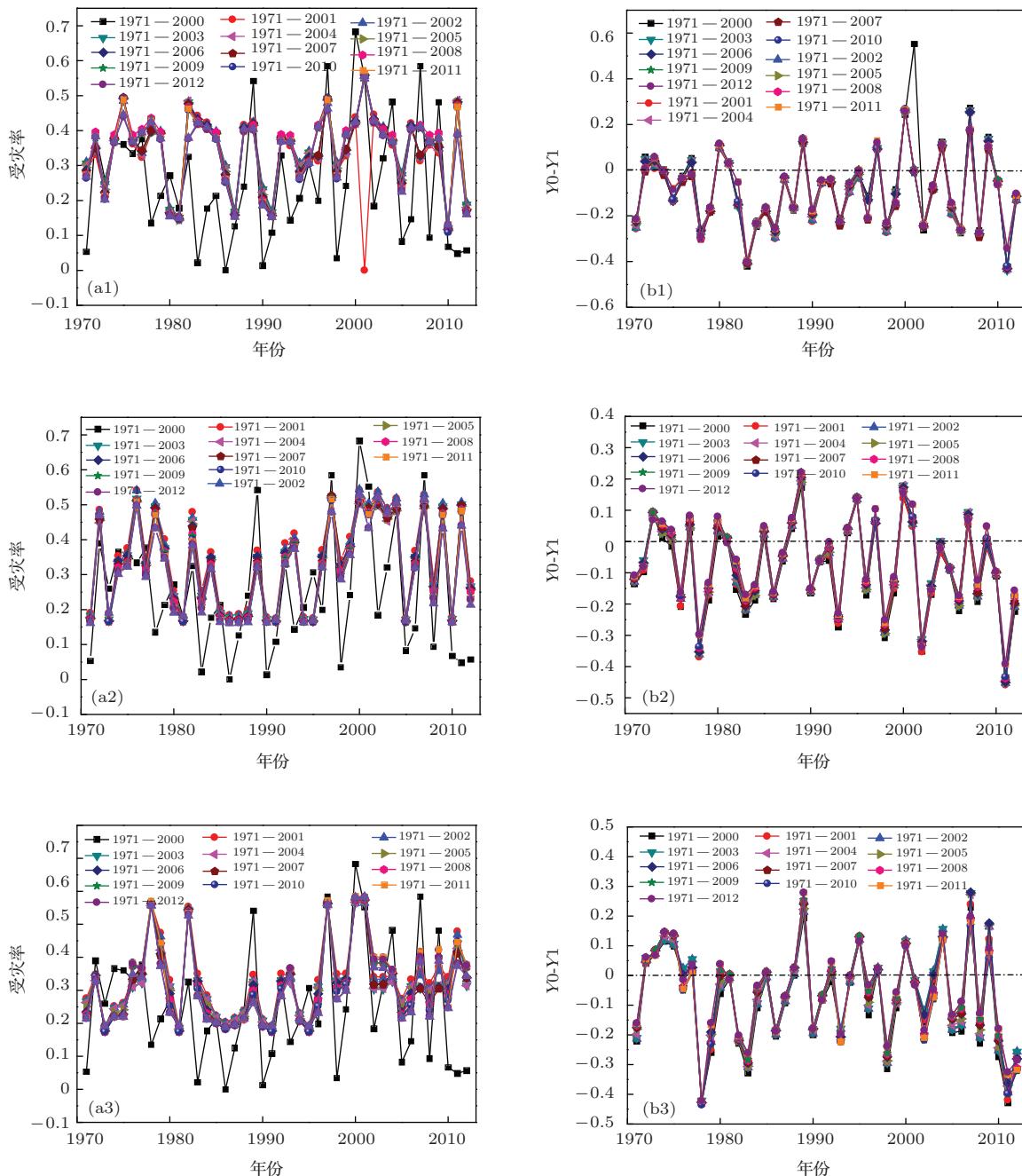


图6 (网刊彩色) 吉林省模拟结果与实际结果的对比 (a1), (a2), (a3) 表示 SPI3, SPI6, SPI9 指数对应的模拟结果与实际结果的对比, 其中黑色线表示实际值; (b1), (b2), (b3) 分别表示在三种指数下实际结果与模拟结果的差值

析, 发现不同样本长度对结果影响较小, 因而说明信息分配和扩散理论较好地克服了小样本数据在统计分析时的不稳定性。

值得注意的是, 本文所用信息扩散方法是基于正态扩散函数完成的^[33], 这一函数反映的是一个均匀扩散过程, 而实际应用中, 获取的样本不完备、各要素间可能存在某些非对称的结构或规律(如变量间的不规则正比关系, 即随着自变量增加, 因变量呈非线性增加), 需要考虑不同方向的扩散速度和扩散方式各异, 即考虑信息的非对称扩散。

参考文献

- [1] Huang R H, Liu Y, Wang L, Wang L 2012 *Chin. J. Atmosph. Sci.* **36** 443 (in Chinese) [黄荣辉, 刘永, 王林, 王磊 2012 大气科学 **36** 443]
- [2] Sheffield J, Wood E F, Roderick M L 2012 *Nature* **491** 435
- [3] Kingtse C M, Jae-Kyung E S, Yoo S H 2009 *J. Climate*. **22** 5962
- [4] Duan Y, Wang W, Cai X J 2013 *Plateau Meteorol.* **32** 1126 (in Chinese) [段莹, 王文, 蔡晓军 2013 高原气象 **32** 1126]

- [5] Xie W S, Tian H 2011 *Meteorol. Monthly* **37** 503 (in Chinese) [谢五三, 田红 2011 气象 **37** 503]
- [6] Yuan W P, Zhou G S 2004 *Adv. Earth Sci.* **19** 982 (in Chinese) [袁文平, 周广胜 2004 地球科学进展 **19** 982]
- [7] Hou W, Zhang C J, Gao G 2013 *Arid Zone Res.* **30** 74 (in Chinese) [侯威, 张存杰, 高歌 2013 干旱区研究 **30** 74]
- [8] Zhang Q, Ju X S, Li S H 1998 *Meteorol. Sci. Technol.* **2** 48 (in Chinese) [张强, 鞠笑生, 李淑华 1998 气象科技 **2** 48]
- [9] Hou W, Zhang C J, Gao G 2012 *Meteorol. Monthly* **38** 701 (in Chinese) [侯威, 张存杰, 高歌 2012 气象 **38** 701]
- [10] How W, Yang P, Zheng Z H, Gong Z Q 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 2106 (in Chinese) [侯威, 杨萍, 郑志海, 龚志强 2009 物理学报 **58** 2106]
- [11] How W, Yang P, Feng G L 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 3932 (in Chinese) [侯威, 杨萍, 封国林 2008 物理学报 **57** 3932]
- [12] How W, Yang J, Feng G L 2014 *Plateau Meteorol.* **33** 432 (in Chinese) [侯威, 杨杰, 封国林 2014 高原气象 **33** 432]
- [13] How W, Zhao J H, Feng G L 2014 *Plateau Meteorol.* **33** 443 (in Chinese) [侯威, 赵俊虎, 封国林 2014 高原气象 **33** 443]
- [14] How W, Yang J, Zhao J H 2013 *J. Appl. Meteorol. Sci.* **24** 695 (in Chinese) [侯威, 杨杰, 赵俊虎 2013 应用气象学报 **24** 695]
- [15] Wang Z L, Wang J S, Li Y H, Wang C H 2013 *Plateau Meteorol.* **30** 839 (in Chinese) [王芝兰, 王劲松, 李耀辉, 王澄海 2013 高原气象 **30** 839]
- [16] Wang J S, Guo J Y, Zhou Y W, Yang L F 2007 *Arid Land Geography* **30** 60 (in Chinese) [王劲松, 郭江勇, 周跃武, 杨兰芳 2007 干旱区地理 **30** 60]
- [17] Dai X G, Fu C B, Wang P 2005 *Chin. Phys.* **14** 850
- [18] Zeng H L, Gao X Q, Zhang W 2005 *Chin. Phys.* **14** 1265
- [19] Pang X L, Huang C F, Ai F L 2012 *Chin. Agricul. Sci. Bull.* **28** 271 (in Chinese) [庞西磊, 黄崇福, 艾福利 2012 中国农学通报 **28** 271]
- [20] Wang Y, Li Y H, Zhao F N, Hu T T 2013 *J. Arid Meteorol.* **31** 43 (in Chinese) [王莺, 李耀辉, 赵福年, 胡田田 2013 干旱气象 **31** 43]
- [21] Li W L, Zhang D Y, Zhang L J 2009 *Arid Land Geography* **32** 754 (in Chinese) [李文亮, 张冬有, 张丽娟 2009 干旱区地理 **32** 754]
- [22] Adger W N 2006 *Global Environ. Change* **16** 268
- [23] Hans-Martin F, Klein R J T 2006 *Climatic Change* **75** 301
- [24] Shamsuddin S, Housshang B 2008 *Nat. Hazards* **46** 391
- [25] Smit B, Wandel J 2006 *Global Environ. Change* **16** 282
- [26] Tan L R, Chen K, Wang J, Yu L Z 2011 *Sci. Geograph. Sin.* **31** 1111 (in Chinese) [谭丽荣, 陈珂, 王军, 俞立中 2011 地理科学 **31** 1111]
- [27] Birkmann J, Luber G, O'Neill B, Takahashi K 2014 *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, Vulnerability* (IPCC) (Cambridge: Cambridge University Press) Cha. 19
- [28] Wang C H, Wang K L, Xiong Y, Xu L F, Yang X L 2003 *Resources and Environment in the Yangtze Basin* **12** 586 (in Chinese) [汪朝辉, 王克林, 熊鹰, 许联芳, 杨勋林 2003 长江流域资源与环境 **12** 586]
- [29] Chen F L, Yan L, Guo Z H 2013 *J. Appl. Oceanography* **32** 577 (in Chinese) [陈菲莉, 颜利, 郭洲华 2013 应用海洋学学报 **32** 577]
- [30] Zhou Y, Wang J A 2012 *Adv. Earth Sci.* **27** 435 (in Chinese) [周瑶, 王静爱 2012 地球科学进展 **27** 435]
- [31] Smith D I 1994 *Water SA Manuscript* **20** 231
- [32] Huang C F, Guo J, Ai F L, Wu T 2013 *J. Natural Disasters* **22** 11 (in Chinese) [黄崇福, 郭君, 艾福利, 吴彤 2013 自然灾害学报 **22** 11]
- [33] Huang C F 2001 *Int. J. General Syst.* **30** 603
- [34] Zhang R, Xu Z S, Huang Z S, Zeng G, Shen S H 2012 *Adv. Earth Sci.* **27** 1229 (in Chinese) [张韧, 徐志升, 黄志松, 曾刚, 申双和 2012 地球科学进展 **27** 1229]
- [35] <http://www.zzys.moa.gov.cn/>
- [36] McKee T B, Doesken N J, Kleist J 1993 *8th Conference on Applied Climatology* Anaheim, California Jan. 17–22, 1993 p179
- [37] McKee T B, Doesken N J, Kleist J 1995 *9th Conference on Applied Climatology* Dallas, Texas, Jan. 15–20, 1995 pp233–236
- [38] Agnew C, Warren A 1996 *J. Arid Environ.* **33** 309
- [39] Huang C F 2012 *Natural Disaster Risk Analysis and Management* (Beijing: Science Press) pp47–49 (in Chinese) [黄崇福 2012 自然灾害风险分析与管理 (北京: 科学出版社) 第 47—49 页]
- [40] Huang C F 2008 *J. Basic Sci. Engineer.* **16** 371 (in Chinese) [黄崇福 2008 应用基础与工程科学学报 **16** 371]
- [41] Yan B W, Guo S L, Xiao Y, Fang B 2007 *Arid Zone Res.* **24** 537 (in Chinese) [闫宝伟, 郭生练, 肖义, 方彬 2007 干旱区研究 **24** 537]
- [42] Gong Z Q, Wang X J, Zhi R, Feng G L 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 4342 (in Chinese) [龚志强, 王晓娟, 支蓉, 封国林 2009 物理学报 **58** 4342]
- [43] Huang J P, Yi Y H, Wang S W, Chou J F 1993 *Q. J. Meteorol. Soc.* **119** 547
- [44] Huang J P, Yi Y H 1991 *Sci. China B* **34** 1246
- [45] Huang J P, Wang S W 1992 *Sci. China B* **35** 207

Analysis of the drought vulnerability characteristics in Northeast China based on the theory of information distribution and diffusion*

Wang Wen-Xiang Zuo Dong-Dong Feng Guo-Lin[†]

(Department of Physics Yangzhou University, Yangzhou 225000, China)

(Received 7 June 2014; revised manuscript received 6 July 2014)

Abstract

The drought vulnerability characteristics from 1971 to 2012 in Northeast China are analysed and the risk in Northeast China is calculated based on the theory of information distribution and diffusion, combining with the standardized precipitation index (SPI) and the drought damage index (DDI) in Northeast China, with considering the meteorological factors and social factors. The probability density function (PDF) of DSI is estimated by using the method of information distribution. The vulnerability of the relationship between DSI and DDI is constructed by using the method of two-dimensional normal information diffusion. Then the average risk can be obtained by calculating the sum (discrete distribution) or integral (continuous distribution) of the product of the PDF of DSI and the vulnerability curve. The results show that the introduction of information distribution and diffusion method to analyze the problem of vulnerability for the situation of small sample could render the PDF of DSI smoother. What is more, the vulnerability of the relationship between DSI and DDI through the DSI to obtain the DDI has clearer physical meaning. Therefore the results could be realistic. More significantly, similar results can be obtained with different simple lengths, which means that the method is insensitive to the simple length and it can well overcome the instability of analysis of the small sample.

Keywords: information distribution and diffusion, standardized precipitation index, vulnerability, risk

PACS: 92.40.De

DOI: 10.7498/aps.63.229201

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 41305056, 41175067) and the National Basic Research Program of China (Grant No. 2012CB955901).

† Corresponding author. E-mail: fenggl@cma.gov.cn