



DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdtqk.2016.03.030

张宇亮, 蒋尚明, 金菊良, 等. 基于交叉验证与信息扩散的旱灾损失风险评估模型[J]. 南水北调与水利科技, 2016, 14(3): 175-182, 83. ZHANG Yu liang, JIANG Shang ming, JIN Ju liang, et al. Drought loss risk assessment model based on cross validation and information diffusion[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2016, 14(3): 175-182, 83. (in Chinese)

基于交叉验证与信息扩散的旱灾损失风险评估模型

张宇亮^{1,2}, 蒋尚明³, 金菊良^{1,2}, 周玉良^{1,2}, 张 明⁴

- (1. 合肥工业大学 土木与水利工程学院, 合肥 230009; 2. 合肥工业大学 水资源与环境系统工程研究所, 合肥 230009;
3. 安徽省水利部淮河水利委员会 水利科学研究院, 水利水资源安徽省重点实验室, 蚌埠 233000;
4. 安徽工程大学 建筑工程学院, 芜湖 241000)

摘要: 利用安徽淮北平原 1990 年- 2007 年的粮食产量资料, 采用滑动平均法分离出趋势产量, 结合因旱减产得到历年的因旱减产率; 为提高信息扩散在旱灾损失风险评估中的精度, 运用基于交叉验证的窗宽优化进行改进, 并通过计算机仿真验证了其在 P-III 分布中的适用性。在此基础上, 构建旱灾损失风险评估模型, 计算了因旱减产率的概率分布, 并对该区域旱灾风险分布进行了分析。对比发现, 基于交叉验证与信息扩散的旱灾损失风险评估模型构建合理, 对解决旱灾风险评估中普遍存在的小样本问题具有一定参考价值。

关键词: 旱灾损失风险; 评估模型; 信息扩散; 交叉验证; 遗传算法

中图分类号: S423 文献标志码: A 文章编号: 1672-1683(2016)03-0175-08

Drought loss risk assessment model based on cross validation and information diffusion

ZHANG Yu liang^{1,2}, JIANG Shang ming³, JIN Ju liang^{1,2}, ZHOU Yu liang^{1,2}, ZHANG Ming⁴

- (1. School of Civil and Hydraulic Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China;
2. Water Resources and Environmental Systems Engineering Institute, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China;
3. Water Resources Research Institute of Anhui Province and Huaihe River Commission, MWR, Bengbu 233000, China;
4. College of Civil Engineering and Architecture, Anhui Polytechnic University, Wuhu 241000, China)

Abstract: According to the data of grain output from 1990 to 2007 in Anhui Huaibei Plain, tendency yields were got by wielding sliding average method, and the annual yield reduction rates caused by drought were obtained by output reductions. The bandwidth was optimized by means of cross validation for the improvement of accuracy of the information diffusion method in the drought loss risk assessment, and the applicability of information diffusion method based on cross validation for the P-III distribution population in terms of computer simulation was proved. On this basis, the assessment model of drought loss risk was established, and the probability distribution of yield reduction rates caused by drought was calculated with information diffusion. Meanwhile, the risk distribution of regional drought was analyzed. It was found that the model in this paper was built reasonably and appropriately by comparison with others, and provided a certain reference value for solving common small sample size problems in the drought risk assessment.

Key words: drought loss risk; assessment model; information diffusion; cross validation; genetic algorithm

收稿日期: 2015-11-29 修回日期: 2016-03-31 网络出版时间: 2016-05-05

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20160505.1116.009.html>

基金项目: 国家自然科学基金项目(51409002; 51409001; 71273081); 水利部重大基建前期项目“全国干旱区划及旱灾风险评估研究”; 中国气象局成都高原气象开放实验室基金课题(LPM2011002)

Fund: National Natural Science Foundation of China(51409002, 51409001, 71273081); Research on National Drought Zonation and Drought Risk Assessment; Laboratory Foundation for Plateau Meteorology of China Meteorological Administration in Chengdu(LPM2011002)

作者简介: 张宇亮(1991-), 男, 安徽肥东人, 主要从事水资源系统工程研究. E-mail: ZYL1027@mail.hfut.edu.cn

通讯作者: 蒋尚明(1983-), 男, 广西桂林人, 工程师, 主要从事农村水利系统工程研究. E-mail: jiangshangming@163.com

旱灾风险评估是估计研究地区干旱发生和旱灾损失的可能性分布函数,确定旱灾风险级别,以及决定哪些旱灾风险需要防控和如何从减轻旱灾风险行动方案集中选择最优方案的动态过程^[1],它可为制定因地制宜的抗旱措施^[23]和水资源管理^[45]提供理论依据和技术支持。目前旱灾风险评估方法主要有基于旱灾风险构成要素的风险指数法^[6]、基于旱灾风险物理成因的评估法、基于历史旱灾损失的概率统计法等^[1],其中基于旱灾风险构成要素的风险指数法通过归纳旱灾损失风险构成要素来宏观地描述风险,但不能直接反映风险的内涵和旱灾系统的不确定性;基于旱灾损失风险成因过程的旱灾损失风险曲线评估模式是建立在一定孕灾环境条件下承灾体损失风险与致灾因子危险性和承灾体脆弱性之间的关系,目前量化旱灾的不利影响仍十分复杂和困难^[7],该评估模式仍是当前旱灾风险评估研究的前沿课题;基于历史旱灾损失的概率统计法则采用旱灾损失序列的频率分析方法估计旱灾损失的可能性分布,因评估原理简洁、计算简便^[1]而较为常用,但在实际应用中存在信息不完备问题^[8-10],结果不尽如人意。为此,黄崇福等将信息扩散引入自然灾害风险评估中,探索出一条解决小样本问题的技术途径^[9-14]。陈晓楠等^[11]在对西安市小麦干旱风险分析中,利用信息扩散模型分析了减产率的概率分布;李文芳^[15]采用非参数信息扩散模型对湖北省水稻生产灾害风险进行了评估,利用水稻单产数据计算出水稻灾害损失率的概率分布。可见,信息扩散法已成为处理不完备样本的有效工具^[16]。在该方法应用中,寻找合适的窗宽是影响扩散估计精度的最关键因素之一^[17]。窗宽又称带宽,来源于核密度估计^[18-19],是用来估计概率密度时各个样本点参与的程度^[20]。传统信息扩散的经验窗宽并不完全适用于水文及自然灾害中的非对称、非正态的序列分析^[21]。目前对于窗宽的改进可归为如下两类:(1)各样本点采用相同的基于均方误差公式推导出的窗宽进行信息扩散,如王新洲等^[17,21-22]提出最优窗宽法,根据黄崇福推导出的均方差公式推导出窗宽的迭代公式,并进一步求解窗宽值;(2)各样本点采用不同的窗宽进行信息扩散,如刘新立等^[23]加入窗宽的修正系数来进行改进。由于各样本点采用不同窗宽方法时扩散估计性质很复杂^[17],故可从第一类改进方法的角度出发进行改进。而国外的核密度估计理论与信息扩散理论较为相似,核密度估计理论目前已有几十多年的发展历史,出现了很多改进方法如交叉验证法^[20,24],这些

方法十分值得借鉴。基于此,为进一步提高信息扩散在旱灾损失风险评估中的精度,在黄崇福的择近窗宽法的基础上^[12],根据交叉验证法采用遗传算法^[25]对窗宽进行优化。与现有研究方法不同,运用基于交叉验证的信息扩散计算各论域点的超越概率值以构建旱灾损失风险评估模型,并在安徽淮北平原进行应用,运用多种方式验证本文改进方法的合理性和有效性。

1 基于交叉验证与信息扩散的旱灾损失风险评估模型的构建

基于交叉验证与信息扩散的旱灾损失风险评估模型的构建步骤如下:

步骤 1: 因旱减产率的计算。首先根据统计的作物逐年产量数据,采用直线滑动平均法,将样本序列在各阶段的变化看作线性函数,依次求取各个阶段的线性趋势方程^[26-27],如式(1)所示;再利用式(2)将各线性函数取平均值计算历史演变趋势产量 $y_r(t)$ ^[26];最后将因旱减产量 $y_d(t)$ 和趋势产量 $y_r(t)$ 代入式(3)得到因旱减产率 $x(t)$,后者不受农业技术水平差异和时间空间的影响^[26],可较好地描述干旱对产量的影响^[26-27]。

$$y_i(t) = a_i + b_i t \quad (1)$$

$$y_r(t) \approx \bar{y} = \frac{1}{q} \sum_{i=1}^q y_i(t) \quad (2)$$

$$x(t) = \frac{y_d(t)}{y_r(t)} \quad (3)$$

式中: i 表示第 i 组样本, $i=1,2,\dots,n-k+1$; n 为样本序列个数; k 为滑动步长,根据相关标准^[28]取为11; t 为第 t 年,当 $i=1$ 时, $t=1,2,\dots,k$,当 $i=2$ 时, $t=2,3,\dots,k+1,\dots$,当 $i=n-k+1$ 时, $t=n-k+1,n-k+2,\dots,n$; $y_i(t)$ 是利用第 i 年至第 $n-k+i$ 年的粮食产量样本数据回归出线性函数在 t 时刻的作物产量回归值,单位为 kg (以下各产量单位无特殊规定外均为 kg); a_i, b_i 是利用第 i 年至第 $n-k+i$ 年的粮食产量样本数据采用最小二乘法计算得到的线性回归参数; $y_r(t)$ 为第 t 年的历史演变趋势产量; q 是第 t 年的作物产量回归值被回归的次数; $x(t)$ 为第 t 年的因旱减产率; $y_d(t)$ 是第 t 年的因旱减产量,可由统计资料得到。

步骤 2: 基于交叉验证和遗传算法的窗宽计算。根据交叉验证法^[20,24],采用加速遗传算法^[25]求解如下最小化问题来优化窗宽 h :

$$\left. \begin{aligned} \min CV(h) \\ h_{\min} \leq h \leq h_{\max} \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

$$h_0 = \begin{cases} 0.8146(b-a) & n=5 \\ 0.5690(b-a) & n=6 \\ 0.4560(b-a) & n=7 \\ 0.3860(b-a) & n=8 \\ 0.3362(b-a) & n=9 \\ 0.2986(b-a) & n=10 \\ 2.6851(b-a)/(n-1) & n \geq 11 \end{cases} \quad (5)$$

$$CV(h) = \int_{a_0}^b f^2(x) dx - \frac{2}{n} \sum_{i=1}^n f^{(i)}(x_i) \quad (6)$$

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}nh} \sum_{j=1}^n \exp\left[-\frac{(x-x_j)^2}{2h^2}\right] \quad (7)$$

$$f^{(i)}(x_i) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}nh} \sum_{j=1}^n \exp\left[-\frac{(x-x_j)^2}{2h^2}\right] \quad (8)$$

式中： h 为优化变量， $[h_{\min}, h_{\max}]$ 为优化变量的变化区间。本次计算时， $h_{\min} = 0.9h_0$ ， $h_{\max} = 1.1h_0$ ， h_0 按照式(5)^[29] 进行计算， b 为样本中的最大值， a 为样本中的最小值， n 是样本点的个数； $CV(h)$ 采用式(6)^[20-24] 计算； $f(x)$ 表示 x 点处的概率密度估计值，见式(7)^[20-24]； a_0 表示样本论域的最大值， b_0 表示样本论域的最小值； i, j 表示样本序号； $f^{(i)}(x_i)$ 表示缺少第 i 个样本时计算得到的 x_i 点处的概率密度估计值，见式(8)^[20, 24]。

步骤 3: 结合步骤 2 优化出的窗宽 h ，运用基于交叉验证的信息扩散计算超越概率值。

(1) 先确定论域。论域按样本 x 的范围来确定^[30]，并取为离散的点，根据计算精度的要求，设 40~70 个控制点，使相邻离散论域点的差值为整数，最后可得式(9)^[29]：

$$U = \{u_1, u_2, \dots, u_j, \dots, u_m\} \quad (9)$$

式中： u_j 为第 j 个论域点的数值； m 表示论域点的总个数。

(2) 将所有大于 0 的样本点^[31] 按照式(10)^[29] 将其所携带的信息，扩散给 U 中所有的点。其中 h 采用步骤 2 优化出的窗宽。

$$f_i(u_i) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}h} \exp\left[-\frac{(u_j-x_i)^2}{2h^2}\right] \quad (10)$$

(3) 令

$$C_i = \sum_{j=1}^m f_i(u_j) \quad (11)$$

按式(12)^[29] 计算相应模糊子集的各隶属函数值。

$$\mu_i(u_j) = \frac{f_i(u_j)}{C_i} \quad (12)$$

(4) 令

$$q(u_j) = \sum_{i=1}^n \mu_i(u_j) \quad (13)$$

$$Q = \sum_{j=1}^m q(u_j) \quad (14)$$

按式(15)^[29] 计算样本点落在 u_j 处的频率值，可作为概率的估计值。

$$p(u_j) = \frac{q(u_j)}{Q} \quad (15)$$

根据计算经验频率中部分样本数值为 0 的处理方法^[31]，按式(16)^[29, 31] 计算超越 u_j 的概率值。

$$r(u_j) = \frac{n}{n_0} \sum_{j=1}^m p(u_j) \quad (16)$$

式中： n_0 为样本总数； n 为大于 0 的样本总数。

(5) 旱灾风险概率的计算。采用函数曲线对所得到的点据 $(u_j, r(u_j))$ 进行拟合，之后根据拟合的曲线，即可计算出大于不同减产率下的累积频率值。

2 精度验证

为验证本文基于交叉验证的信息扩散的精度，选择水文常用的皮尔逊 θ 型的总体分布^[32] 作随机抽取试验：

$$f(v) = \frac{\beta^\alpha}{\Gamma(\alpha)} (v - \alpha_0)^{\alpha-1} e^{-\beta(v - \alpha_0)} \quad (17)$$

式中： $\Gamma(\alpha)$ 为 α 的伽玛函数； α, β, α_0 为皮尔逊 θ 型分布的形状、尺度和位置参数，本次 $\alpha = 2.1$ ， $\beta = 0.1$ ， $\alpha_0 = -2$ 。采用计算机仿真的方法^[33] 模拟出 n 个随机样本点，重复模拟 M 次，分别按照交叉验证法与择近扩散法^[29]、最优窗宽法^[17]、修正系数法^[23] 进行概率密度估计，再按概率密度估计的均方误差公式^[17] 计算出各方法在抽取的不同样本点个数下估计的均方误差值：

$$\delta = \frac{1}{M \cdot N} \sum_{j=1}^M \sum_{i=1}^N (f(v_i) - f_j(v_i))^2 \quad (18)$$

式中： M 是重复试验次数，在模拟计算时发现重复试验次数在取至 60 次时，估计的均方误差已基本收敛，故取为 60 次； N 是概率密度函数定义域上所取用于计算误差的均匀离散点个数，本次取为 101； v_i 是第 i 个用于计算误差的离散点， $i = 1, 2, \dots, 1000$ ； $f(v_i)$ 是 v_i 处的实际概率密度值； $f_j(v_i)$ 表示根据第 j 次试验结果采用概率密度估计方法计算出的 v_i 处概率密度。

各方法在抽取的不同样本点个数下估计的均方误差值计算结果见表 1。

从表 1 可知，本文基于交叉验证的信息扩散较其它 3 类方法的计算精度均有所提高，平均误差比择近扩散法、最优窗宽法、修正系数法分别提高了 2%、27% 和 23%。

表 1 皮尔逊Ⅲ型理论分布的计算机仿真估计的均方误差 $(\times 10^{-5})$

Tab. 1 Estimated mean square errors of computer simulation in Pearson III theoretical distribution

方法	样本数										平均值	
	10	15	20	30	40	50	60	70	80	90		100
择近扩散法	3.69	2.97	2.46	1.86	1.57	1.39	1.24	1.16	1.13	1.13	1.15	1.80
最优窗宽法	4.66	3.56	3.14	2.64	2.33	2.12	1.87	1.75	1.57	1.51	1.45	2.42
修正系数法	4.09	3.65	3.05	2.48	2.15	1.91	1.70	1.61	1.57	1.59	1.62	2.31
交叉验证法	3.57	2.93	2.41	1.88	1.54	1.36	1.22	1.13	1.09	1.10	1.12	1.76

3 应用实例

3.1 研究区概况

安徽淮北平原区是指安徽省境内淮河以北的平原区域,面积 3 74 万 km^2 ,为安徽全省总面积的 26.8%,是我国重要的粮食生产基地^[34-35]。为保证行政区划的完整性,本次旱灾风险评估的地区包括阜阳市、淮南市、蚌埠市、亳州市、淮北市、宿州市六市,该区耕地 2 14 万 km^2 ,占全省耕地的 49.8%,而水资源总量为 779 亿 m^3 ,仅占全省总水资源量的 13%^[36],可见,安徽淮北平原区水少地多现象明显,水资源供需矛盾异常突出,属安徽省旱灾风险较高区域之一^[37],特别是 2000 年以来安徽淮北平原多年平均因旱受灾面积为 58.6 亿 m^2 ,占安徽省多年平均因旱受灾面积的 68.6%^[36]。因此,开展安徽淮北平原旱灾风险评估研究,对指导区域科学制定抗旱减灾措施,降低旱灾风险影响,具有重要意义。

3.2 计算结果

统计安徽淮北平原区各市 1990 年-2007 年的粮食产量与因旱减产数据(来自各市的抗旱规划和文献[36]),结合本文构建的基于交叉验证与信息扩散的旱灾损失风险评估模型,开展旱灾损失风险评估研究,具体计算过程如下:

(1) 统计市逐年粮食产量数据,由式(2)求取趋势产量,见表 2。

(2) 统计各市逐年粮食因旱减产产量,由式(3)计算出因旱减产率,见图 1-图 2。

(3) 依据式(4),将计算出的大于 0 的因旱减产率结合加速遗传算法^[25]计算出各地区样本对应的窗宽值见表 3。

(4) 确定论域。根据因旱减产率的数据范围[0, 0.402],本次论域确定为[0, 0.45],取 46 个控制点构成离散论域:

$$U = \{0, 0.01, \dots, 0.45\} \quad (19)$$

(5) 将 x, U, h , 代入式(10)-式(16),即可得到大于论域点 u_j 的超越概率值 $r(u_j)$ 。

表 2 安徽淮北平原 1990 年-2007 年单位面积的粮食趋势产量

Tab. 2 Grain trend outputs per unit area in Anhui Huaibei Plain from 1990 to 2007

年份	各地区的单位面积的粮食趋势产量/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$)					
	蚌埠市	亳州市	阜阳市	淮北市	淮南市	宿州市
1990	0.236	0.264	0.302	0.249	0.452	0.302
1991	0.244	0.282	0.316	0.250	0.459	0.308
1992	0.262	0.309	0.341	0.253	0.471	0.321
1993	0.283	0.331	0.344	0.254	0.497	0.336
1994	0.297	0.339	0.341	0.253	0.507	0.343
1995	0.308	0.346	0.337	0.252	0.513	0.351
1996	0.296	0.348	0.331	0.252	0.514	0.353
1997	0.296	0.342	0.323	0.253	0.515	0.354
1998	0.309	0.338	0.319	0.257	0.514	0.354
1999	0.321	0.333	0.314	0.262	0.513	0.354
2000	0.333	0.329	0.310	0.266	0.512	0.354
2001	0.343	0.316	0.301	0.272	0.504	0.351
2002	0.354	0.301	0.292	0.278	0.494	0.344
2003	0.370	0.286	0.290	0.288	0.478	0.335
2004	0.406	0.281	0.293	0.304	0.478	0.332
2005	0.466	0.275	0.297	0.318	0.473	0.328
2006	0.586	0.278	0.306	0.334	0.471	0.329
2007	0.590	0.293	0.316	0.348	0.467	0.325

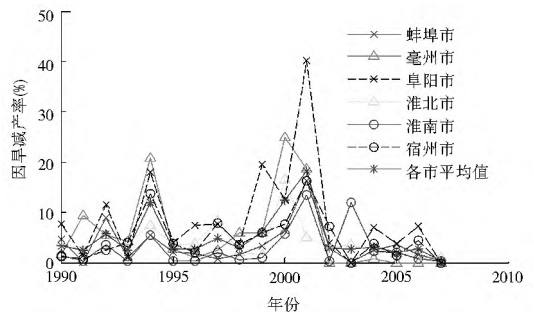


图 1 安徽淮北平原各年因旱减产率

Fig. 1 Yield reduction rates caused by drought for each year in Anhui Huaibei Plain

(6) 采用 P-III 型函数曲线对点据 $(u_j, r(u_j))$ 进行适线拟合见图 3。根据 P-III 函数曲线即可计算因旱减产率大于 5%、10%、15%、20%、25%、30% 出现的风险概率见表 4。

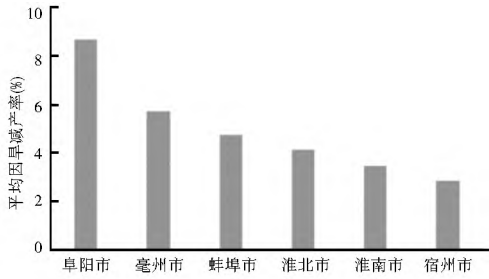


图2 图2 安徽淮北平原 1990 年- 2007 年因旱减产率平均值

Fig.2 Yield reduction mean rates caused by drought from 1990 to 2007 in Anhui Huabei Plain

表3 徽淮北平原各地区样本对应的窗宽值
Tab.3 The bandwidth of each sample of all cities in Anhui Huaibei Plain

地区	蚌埠市	亳州市	阜阳市	淮北市	淮南市	宿州市
窗宽 h	0.0231	0.0486	0.0630	0.0218	0.0186	0.0250

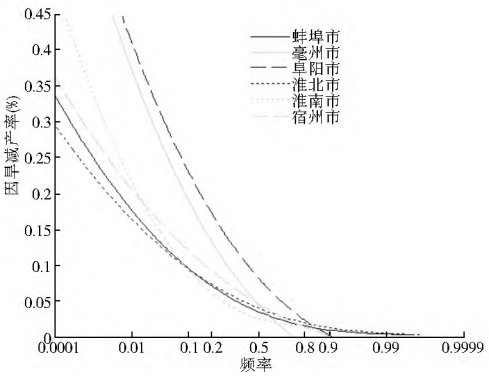


图3 安徽淮北平原六市粮食减产率的累积频率点据拟合曲线

Fig.3 The fitting curves of accumulated frequency points of grain yield reduction rates in 6 cities of Anhui Huabei Plain

表4 安徽淮北平原发生不同粮食减产率下的超越概率(交叉验证法)

Tab.4 The exceedance probabilities of different grain yield reduction rates in Anhui Huabei Plain (Cross validation)

地区	不同因旱减产率下的超越概率(%)						期望减产率 (%)
	5%	10%	15%	20%	25%	30%	
阜阳市	65.4	41.8	24.9	14.2	7.9	4.3	10.2
亳州市	47.0	28.0	16.0	8.9	4.9	2.6	6.6
宿州市	45.9	16.1	4.7	1.2	0.3	0.1	5.4
淮北市	38.0	8.5	1.7	0.3	0.1	0.0	4.8
蚌埠市	33.8	8.8	2.2	0.5	0.1	0.0	4.5
淮南市	25.3	8.7	3.4	1.4	0.6	0.2	4.3

3.3 讨论与分析

3.3.1 因旱减产率的变化分析

从安徽淮北平原各地区各年因旱减产率折线(图1)可看出,安徽淮北平原因旱减产率总体上是先增大后减小,平均因旱减产率最大的是2001年,为18.29%,在1994年和2000年的平均因旱减产率也

较大;平均因旱减产率最小的是2007年,为0.28%。另外,各市各年因旱减产率的最大值是阜阳市2001年的因旱减产率40.22%。从各市来看,阜阳市的因旱减产率平均值最大,且每年因旱减产率在安徽淮北平原中都较大,波动幅度也较大;其次是亳州市,有4年的因旱减产率超过了阜阳市,因旱减产率的变化趋势是先增大再减小;之后是宿州市和淮北市,其因旱减产率损失在淮北平原处于中等水平;最后是蚌埠市和淮南市,其因旱减产率在淮北平原处于较低水平。

3.3.2 计算结果的合理性与机理分析

(1) 计算结果的合理性分析。安徽淮北平原粮食总产量在大于不同减产率下的风险概率见表4。从表4可知,安徽淮北平原期望因旱减产率从大到小排列依次是阜阳市>亳州市>宿州市>淮北市>蚌埠市>淮南市,这与图1、图2的分析结果完全一致。对淮北平原六市采用基于择近窗宽的信息扩散和适线法^[31]得到的风险概率结果(表5)表明,择近窗宽法的计算结果与交叉验证法十分接近,适线法计算得到的期望值基本与本次计算结果相近,说明基于交叉验证的信息扩散是可行的。将表4的计算结果与基于模糊综合评价的旱灾风险评价结果^[37]、基于改进的突变评价的旱灾风险评价结果^[37]、基于信息扩散的旱灾风险评价结果相比较^[38]见表6,风险值排序相差大于1个名次的城市均只有2个,说明基于交叉验证与信息扩散的旱灾损失风险评估模型的评估结果是相对合理的。

(2) 计算结果的机理分析。前文所得的各地区期望因旱减产率从大到小排序的原因,可从以下几方面分析。

a. 降水。干旱的发生,不在于平均降水量的多少,而主要决定于降水量与平均状态的偏少大小^[39]。故在非汛期的年平均降水量标准差方面见表7,阜阳市和亳州市的年平均降水量的标准差分别为120.37mm和115.92mm,与其它地区相比偏大,所以降雨年际分布不均匀是导致其旱灾风险偏大的原因之一。蚌埠市和淮南市的年平均降水量标准差偏小,降水的年际分配相对较均匀,其旱灾风险也偏小。

b. 地下水^[40-41]。地下水资源偏少或地下水位过深,会使得旱灾期间没有充足的或难以获取地下水资源来补给农田灌溉,导致旱灾风险偏大。研究区内单位面积的地下水资源量当中,蚌埠市、淮北市单位面积地下水资源量分别为15.63万m³/km²和14.67万m³/km²,与安徽淮北平原其它地区相比较,而宿州市和亳州市的单位面积地下水资源量较少;阜阳市和亳州市平均地下水埋深分别是3.20m和

表 5 徽淮北平原发生不同粮食减产率下的超越概率(择近扩散法与适线法)

Tab.5 The exceedance probabilities of different grain yield reduction rates in Anhui Huaibei Plain (Approaching diffusion and curve fitting)

地区	择近扩散法						期望 减产率 (%)	适线法						期望 减产率 (%)
	不同因旱减产率下的超越概率(%)							不同因旱减产率下的超越概率(%)						
	5%	10%	15%	20%	25%	30%		5%	10%	15%	20%	25%	30%	
阜阳市	64.9	40.6	22.9	12.6	7.6	5.3	9.69	56.5	31.4	16.8	8.8	4.5	2.3	8.24
亳州市	42.7	21.8	12.5	7.8	3.7	1.1	5.82	35.7	21.8	14.2	9.6	6.6	4.6	6.83
宿州市	42.7	14.3	5.7	0.7	0.0	0.0	4.80	37.7	13.0	4.3	1.4	0.4	0.1	4.88
淮北市	39.2	8.9	4.4	0.6	0.0	0.0	4.53	23.4	3.1	0.4	0.0	0.0	0.0	3.77
蚌埠市	34.9	9.1	4.4	0.6	0.0	0.0	4.22	23.5	5.6	1.3	0.3	0.1	0.0	3.39
淮南市	25.3	10.7	2.3	0.0	0.0	0.0	3.55	21.3	10.5	5.7	3.3	1.9	1.2	3.69

表 6 不同方法的排序值比较

Tab.6 The comparative sheet of sortings by different methods

方法	地区					
	阜阳市	亳州市	宿州市	淮北市	蚌埠市	淮南市
交叉验证法	1	2	3	4	5	6
模糊综合评价 ^[37]	4	1	2	5	3	6
突变评价法 ^[37]	6	1	3	4	2	5
文献 ^[38]	1	4	2	5	3	—

表 7 徽淮北平原旱灾风险评价结果机理分析^[36]

Tab.7 The mechanism analysis sheet of drought risk assessments results in Anhui Huaibei Plain

地区	非汛期年平均降雨量的标准差/mm	单位土地面积地下水资源量/(万 m ³ ·km ²)	平均地下水埋深/m	有效灌溉面积比例(%)
宿州	85.17	13.89	2.86	64
淮南	114.03	14.22	1.13	52
阜阳	120.37	16.05	3.20	37
亳州	115.92	14.51	3.14	39
淮北	124.52	14.67	3.46	38
蚌埠	106.94	15.63	2.07	48

3.14 m, 与其它安徽淮北平原地区相比较深, 而蚌埠市和淮南市的地下水埋深较浅。

c. 有效灌溉面积^[42]。在有效灌溉面积比例中, 蚌埠市和淮南市的灌溉面积比例较大, 分别为 48% 和 52%, 而它们的旱灾风险在淮北平原偏小, 说明有效灌溉面积能提高蚌埠市和淮南市的抗旱能力, 在一定程度上降低当地的旱灾风险, 而亳州市和阜阳市的有效灌溉面积比例较小, 这是导致当地旱灾风险偏大的原因之一。

d. 综合分析。阜阳市旱灾风险最大, 这与其非汛期年平均降水量标准差较大、地下水埋深较深和有效灌溉面积比例小有关。亳州市旱灾风险也较大, 这与其非汛期年平均降水量标准差偏大、地下水埋深偏深和有效灌溉面积比例偏小有关, 所以阜阳

市和亳州市有待提高有效灌溉面积比例。宿州市旱灾风险偏大, 这与当地单位土地面积地下水资源量偏小有关, 所以当地可以在水文地质条件允许的前提下尝试新建地下水库的方法降低旱灾风险。

3.3.3 旱灾风险分布图分析

为反映不同地区旱灾对减产影响程度的分布情况, 分别以因旱减产率大于 5%、10%、20% 出现的风险概率作为评价指标, 绘制出风险分布图, 见图 4、图 5、图 6。

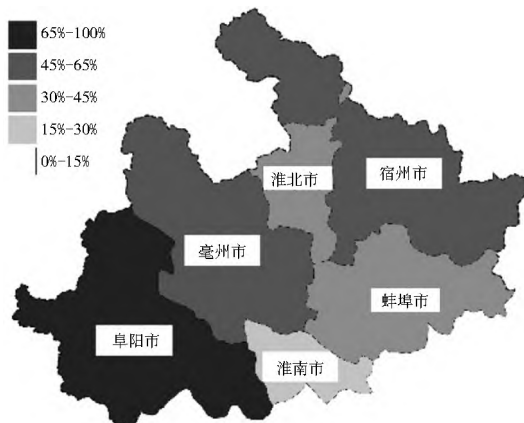


图 4 安徽淮北平原粮食减产率 > 5% 的风险概率分布
Fig.4 Distribution of risk probability of grain with yield reduction rates larger than 5%

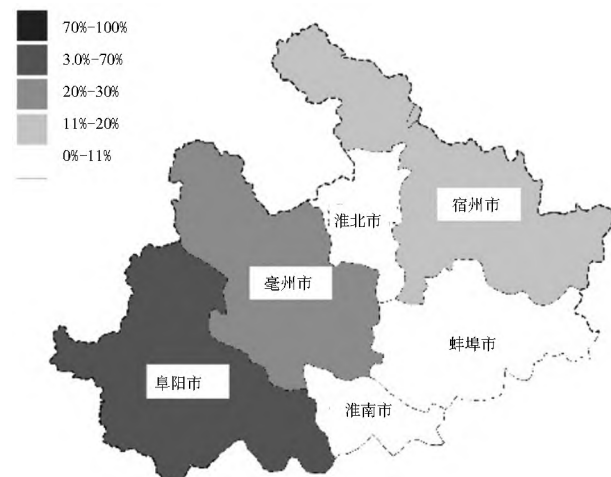


图 5 安徽淮北平原粮食减产率 > 10% 的风险概率分布
Fig.5 Distribution of risk probability of grain with yield reduction rates larger than 10%

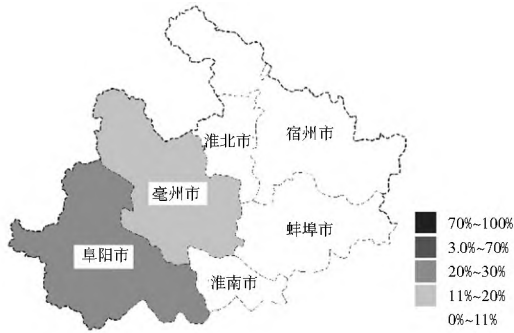


图6 安徽淮北平原粮食减产率 $>20\%$ 的风险概率分布

Fig.6 Distribution of risk probability of grain with yield reduction rates larger than 20%

(1) 由图4—图6可知,对于因旱粮食减产率分别大于 5% 和 10% 的风险概率分布,阜阳市、亳州市、宿州市旱灾风险较大,淮南市、蚌埠市、淮北市风险较小,区域风险基本呈现东西两侧较大,中间风险较小的规律;而对于因旱粮食减产率大于 20% 的风险概率分布,阜阳市、亳州市旱灾风险较大,淮北市、宿州市、蚌埠市、淮南市风险较小,区域风险基本呈现西南较大,东北较小的规律。

(2) 对比图4—图6,图6中各地区的旱灾风险差异明显比图4、图5小,说明各地区发生较大损失时的旱灾风险更相近;图6中旱灾风险从西南到东北逐渐变小,而图4、图5中旱灾风险是从西南到东北先变小再变大,其中图4中东西两侧风险差异比图5大。

4 结论

(1) 运用交叉验证和遗传算法优化样本窗宽,提出了基于交叉验证与信息扩散的旱灾损失风险评估模型,计算出大于不同因旱减产率下的累积频率值,为探索小样本量的频率分布问题提供了新途径。

(2) 采用计算机仿真的方法模拟随机样本点,验证了基于交叉验证的信息扩散对所试验的P-III型的总体分布的精度较接近扩散法、最优窗宽法、修正系数法高。同时,将基于交叉验证与信息扩散的旱灾损失风险评估模型对安徽淮北平原的评估结果与其它方法的计算结果相比较,验证了模型的合理性。

(3) 根据计算的因旱减产率期望值,得到各地区旱灾风险从大到小的排序:阜阳市 $>$ 亳州市 $>$ 宿州市 $>$ 淮北市 $>$ 蚌埠市 $>$ 淮南市。通过资料分析,发现降水、地下水和有效灌溉面积是旱灾风险的影响因素。

(4) 根据安徽淮北平原大于不同粮食减产率下的旱灾风险分布图,发现以因旱减产率大于 5% 、 10% 为评价指标时,安徽淮北平原旱灾风险整体呈

现东西两侧大,中间较小的特点,以因旱减产率大于 20% 为评价指标时,安徽淮北平原旱灾风险整体呈现西南较大,东北较小的特点。

参考文献(References):

- [1] 金菊良, 郦建强, 周玉良, 等. 旱灾风险评估的初步理论框架[J]. 灾害学, 2014, 29(3): 1-10. (JIN Jir liang, LI Jian qiang, ZHOU Yur liang, et al. Theoretical framework of drought risk assessment[J]. Journal of Catastrophology, 2014, 29(3): 1-10. (in Chinese))
- [2] 杨帅英, 郝芳华, 宁大同. 干旱灾害风险评估的研究进展[J]. 安全与环境学报, 2004, 4(2): 79-82. (YANG Shuar ying, HAO Fang-hua, NING Da tong. New advances on drought risk assessment and its prospects[J]. Journal of Safety and Environment, 2004, 4(2): 79-82. (in Chinese))
- [3] 景国勋, 刘冬华, 杨永菊. 基于信息扩散理论的河南省农业旱灾风险评估[J]. 应用基础与工程科学学报, 2006, 14(5增刊): 88-93. (JING Guo-xun, LIU Dong-hua, YANG Yong-ju. Risk assessment of agricultural flood & drought disaster in Henan province based on information diffusion theory[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2006, 14(5 Supplement): 88-93. (in Chinese))
- [4] Belal A A, El ramady H R, Mohamed E S, et al. Drought risk assessment using remote sensing and GIS techniques[J]. 2014, 7(1): 35-53.
- [5] Bordi I, Fraedrich K, Petitta M, et al. Large Scale Assessment of Drought Variability Based on NCEP/NCAR and ERA-40 Re-Analyses[J]. Water Resour Manag, 2006, 20(6): 899-915.
- [6] 盛金保, 冯靖宇, 彭雪辉. 小型水库风险分析方法研究[J]. 水利水电工程学报, 2008(1): 28-35. (SHENG Jir bao, FENG Jing yu, PENG Xue hui. Research on risk analysis of small reservoir dams[J]. Hydr Science and Engineering, 2008, (1): 28-35. (in Chinese))
- [7] 魏华林, 龙梦洁, 李芳. 旱灾风险的特征及其防范研究——由西南旱灾和冬麦区大旱引发的思考[J]. 保险研究, 2011, 18(3): 3-18. (WEI Hua lin, LONG Meng-jie, LI Fang. The research on the characteristics and precaution of drought risk—the thinking triggered by southwest and winter wheat area drought[J]. Insurance Studies, 2011, 18(3): 3-18. (in Chinese))
- [8] 张韧, 徐志升, 申双和, 等. 基于小样本案例的自然灾害风险评估——信息扩散概率模型[J]. 系统科学与数学, 2013, 33(4): 445-456. (ZHANG Ren, XU Zhi sheng, SHEN Shuang he, et al. An unsymmetrical information diffusion probability model for risk evaluation of natural disaster based on rare sample cases[J]. Journal of Systems Science and Mathematical Sciences, 2013, 33(4): 445-456. (in Chinese))
- [9] 黄崇福. 自然灾害风险评估理论与实践[M]. 北京: 科学出版社, 2005. (HU ANG Chong-fu. Risk assessment of natural disaster theory & practice[M]. Beijing: Science Press, 2005. (in Chinese))
- [10] 黄崇福, 王家鼎. 模糊信息优化处理技术及其应用[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 1995: 58-62. (HU ANG Chong fu,

- WANG Jiar ding. Fuzzy information optimization processing technology and its application[M]. Beijing: Beijing Aeronautics and Astronautics Press, 1995: 59-62. (in Chinese)
- [11] 陈晓楠, 贾琦, 高宇, 等. 基于信息扩散技术的西安市小麦干旱风险分析[J]. 华北水利水电学院学报, 2012, 33(3): 20-22. (CHEN Xiaonan, JIA Qi, GAO Yu, et al. Analysis on wheat drought risk based on information diffusion technology in Xi'an City[J]. Journal of North China Institute of Water Conservancy and Hydroelectric Power, 2012, 33(03): 20-22. (in Chinese))
- [12] 黄崇福, 刘新立, 周国贤, 等. 以历史灾情资料为依据的农业自然灾害风险评估方法[J]. 自然灾害学报, 1998, 7(2): 4-12. (HUANG Chongfu, LIU Xirli, ZHOU Guoxian, et al. Agricultural natural disaster risk assessment method according to the historic disaster data[J]. Journal of Natural Disasters, 1998, 7(2): 4-12. (in Chinese))
- [13] ZHONG L, LIU L, LIU Y. Natural disaster risk assessment of grain production in Dongting Lake Area, China[J]. Agriculture and Agricultural Science Procedia, 2010, 1: 24-32.
- [14] LI Q, ZHOU J, LIU D, et al. Research on flood risk analysis and evaluation method based on variable fuzzy sets and information diffusion[J]. Safety Science, 2012, 50(5): 1275-1283.
- [15] 李文芳. 基于非参数信息扩散模型的湖北水稻生产灾害风险评估[J]. 江西农业大学学报: 社会科学版, 2012, 11(1): 58-62. (LI Wenfang. Evaluating natural disaster risks in rice production of Hubei Province by nonparameter information diffusion model[J]. Journal of Jianxi Agricultural University: Social Sciences Edition, 2012, 11(1): 58-62. (in Chinese))
- [16] 王积全, 李维德. 基于信息扩散理论的干旱区农业旱灾风险分析: 以甘肃省民勤县为例[J]. 中国沙漠, 2007, 27(5): 826-830. (WANG Jiquan, LI Weide. Analysis on agricultural drought risk based on information diffusing principle: A case study of Minqin County in arid area[J]. Journal of Desert Research, 2007, 27(5): 826-830. (in Chinese))
- [17] 王新洲. 论信息扩散估计的窗宽[J]. 测绘科学, 2001, 26(1): 16-19. (WANG Xirzhou. On the window width in information spread estimation[J]. Science of Surveying and Mapping, 2001, 26(1): 16-19. (in Chinese))
- [18] Parzen E. On estimation of a probability density function and mode[J]. The Annals of Mathematical Statistics, 1962, 33(3): 1065-1076.
- [19] CAO R, Cuevas A, Manteiga W G. A comparative study of several smoothing methods in density estimation[J]. Computational Statistics & Data Analysis, 1994, 17(2): 153-176.
- [20] 吴喜之, 王兆军. 非参数统计方法[M]. 北京: 高等教育出版社, 1996: 159. (WU Xizhi, WANG Zhaojun. The method of nonparametric statistics [M]. Beijing: Higher Education Press, 1996: 159. (in Chinese))
- [21] 白成祖, 张韧, 洪梅, 等. 信息扩散模型的窗宽优化与鱼雷战术效能实验评估[J]. 指挥控制与仿真, 2013, 35(6): 58-61, 70. (BAI Chengzu, ZHANG Ren, HONG Mei, et al. Assessment experiment on torpedo campaign efficiency based on information diffusion with window width optimization[J]. Command Control & Simulation, 2013, 35(6): 58-61, 70. (in Chinese))
- [22] 游扬声. 一般分布模式下 GIS 位置数据的不确定性研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2005. (YOU Yangsheng. The research on the uncertainty of position data in GIS in general distribution mode[D]. Wuhan: Wuhan University, 2005. (in Chinese))
- [23] 刘新立, 黄崇福, 史培军. 对不完备样本下风险分析方法的改进及应用-以湖南省农村种植业水灾为例[J]. 自然灾害学报, 1998, 7(2): 13-19. (LIU Xirli, HUANG Chongfu, SHI Peijun. The improvement and application of incomplete sample risk analysis[J]. Journal of Natural Disasters, 1998, 7(2): 13-19. (in Chinese))
- [24] W. B A. An alternative method of cross-validation for the smoothing of density estimates[J]. Biometrika, 1984, 71(2): 353-360.
- [25] 金菊良, 杨晓华, 丁晶. 标准遗传算法的改进方案-加速遗传算法[J]. 系统工程理论与实践, 2001, 21(04): 8-13. (JIN Jiliang, YANG Xiaohua, DING Jing. An improved simple genetic algorithm accelerating genetic algorithm [J]. Systems Engineering Theory & Practice, 2001, 21(04): 8-13. (in Chinese))
- [26] 薛昌颖, 霍治国, 李世奎, 等. 华北北部冬小麦干旱和产量灾损的风险评估[J]. 自然灾害学报, 2003, 12(1): 131-139. (XUE Changying, HUO Zhiguo, LI Shirui, et al. Risk assessment of drought and yield losses of winter wheat in the northern part of North China[J]. Journal of Natural Disasters, 2003, 12(1): 131-139. (in Chinese))
- [27] 李世奎, 霍治国, 王道龙, 等. 中国农业灾害风险评估与对策[M]. 北京: 气象出版社, 1999: 72-73. (LI Shirui, HUO Zhiguo, WANG Daolong, et al. Risk assessment and strategies of agricultural disasters in China[M]. Beijing: China Meteorological Press, 1999: 72-73. (in Chinese))
- [28] QX/T 8-2007, 小麦干旱灾害等级[S]. (QX/T 8-2007, Disaster grade of drought for wheat[S]. (in Chinese))
- [29] 庞西磊, 黄崇福, 艾福利. 基于信息扩散理论的东北三省农业洪灾风险评估[J]. 中国农学通报, 2012, 28(8): 271-275. (PANGLi, HUANG Chongfu, AI Fuli. Risk assessment on agricultural flood of northeast China based on information diffusion theory [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2012, 28(8): 271-275. (in Chinese))
- [30] 游珍, 封志明, 杨格格, 等. 基于信息扩散理论的中国西部地区地震风险评估[J]. 地理科学, 2011, 31(9): 1125-1130. (YOU Zhen, FENG Zhiming, YANG Gerge, et al. Seismic risk assessment based on information diffusion theory in the western China[J]. Scientia Geographica Sinica, 2011, 31(9): 1125-1130. (in Chinese))
- [31] 詹道江, 徐向阳, 陈元芳. 工程水文学[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2010: 142-153, 183. (ZHAN Daojiang, XU Xiangyang, CHEN Yuanfang. Engineering hydrology[M]. Beijing: China Water Power Press, 2010: 142-153, 183. (in Chinese))
- [32] 黄伟昊, 左利钦, 李寿千, 等. 设计流量推求中特大值判断方法的改进[J]. 水利水运工程学报, 2012, (5): 8-12. (HUANG Weihao, ZUO Liqin, LI Shouqian, et al. An improvement in judging the extraordinary value of flood frequency analysis[J]. Hydro Science and Engineering, 2012, (5): 8-12. (in Chinese))

(上转第83页)

- [J]. 水资源保护, 2011, 27(4): 19-21. (WEI Peng xiang. Application of Visual Modflow to simulation of groundwater contamination migration[J]. Water Resources Protection, 2011, 27(4): 19-21. (in Chinese))
- [10] 贺国平, 邵景力, 崔亚莉, 等. FEFLOW 在地下水水流模拟方面的应用[J]. 成都理工大学学报: 自然科学版, 2003, 30(4): 356-361. (HE Guo ping, SHAO Jing-li, CUI Ya-li, et al. Application of FEFLOW to groundwater flow simulation[J]. Journal of Chengdu University of Technology: Science & Technology Edition, 2003, 30(4): 356-361. (in Chinese))
- [11] 陈舟, 施佳会, 杨小辉, 等. 某垃圾发电厂地下水污染模拟研究[J]. 工程勘察, 2014, (12). (CHEN Zhou, SHI Jia-hui, YANG Xiao-hui, et al. Simulation study on groundwater pollution of a garbage power plant[J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2014, (12). (in Chinese))
- [12] 徐嘉璐, 陈泉萌, 郭倩, 等. 渗流井取水数值模拟及应用[J]. 南水北调与水利科技, 2013, 11(4): 97-100. (XU Jia-lu, CHEN Xiao-meng, GUO Qian, et al. Numerical simulation and application of water taking by seepage well[J]. South to north Water Transfers and Water Science & Technology, 2013, 11(4): 97-100. (in Chinese))
- [13] 刘世翔, 胡艳飞, 闫清华, 等. 专家克里金插值法在空间插值中的应用[J]. 地质与资源, 2011, 20(4): 292-294. (LIU Shi-xiang, HU Yan-fei, YAN Qing-hua, et al. Application of expert Kriging algorithm in the spatial interpolation[J]. Geology and Resources, 2011, 20(4): 292-294. (in Chinese))
- [14] 郑西来, 钱会, 席临平, 等. 地下水系统中石油污染物的吸附转移研究[J]. 勘察科学技术, 1998, (1): 26-29. (ZHENG Xi-lai, QIAN Hui, XI Lin-ping, Absorption transference study of petroleum contaminant in ground water system[J]. Site Investigation Science and Technology, 1998, (1): 26-29. (in Chinese))
- [15] H P, DA B, C Z. MODFLOW/MT3DMS-based reactive multi-component transport modeling[J]. Ground Water, 2003, 41(2): 247-257.
- [16] Curtis G P, Davis J A, Naftz D L. Simulation of reactive transport of uranium(VI) in groundwater with variable chemical conditions[J]. Water Resources Research, 2006, 42(4): 336-336.

(下接第 182 页)

- [33] 王文圣, 丁晶, 金菊良. 随机水文学[M]. 第二版. 北京: 中国水利水电出版社, 2008: 48-53. (WANG Wen-sheng, DING Jing, JIN Ju-liang. Stochastic hydrology[M]. Second Edition. Beijing: China Water Power Press, 2008: 48-53. (in Chinese))
- [34] 王倩, 刘雪华, 岳天祥. 淮河流域粮食生产潜力空间格局研究[J]. 生态经济, 2014, 30(7): 24-27. (WANG Qing, LIU Xue-hua, YUE Tian-xiang. Study on the Spatial Patterns of Food Production Potential in the Huaihe River Basin[J]. Ecological Economy, 2014, 30(7): 24-27. (in Chinese))
- [35] 安徽省水利厅. 安徽水旱灾害[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1998: 195. (Water Resource Department of Anhui Province. Flood and drought disasters in Anhui Province[M]. Beijing: China Water Power Press, 1998: 195. (in Chinese))
- [36] 安徽省统计局. 安徽统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2000-2013. (Bureau of Statistics of Anhui. Anhui statistical yearbook[M]. Beijing: China Statistics Press, 2000-2013. (in Chinese))
- [37] 唐明, 邵东国, 姚成林, 等. 改进的突变评价法在旱灾风险评价中的应用[J]. 水利学报, 2009, 40(7): 858-862, 869. (TANG Ming, SHAO Dong-guo, YAO Cheng-lin, et al. Improved catastrophe theory based evaluation method and its application to drought disaster risk evaluation[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2009, 40(7): 858-862, 869. (in Chinese))
- [38] 欧阳蔚, 于艳青, 金菊良, 等. 基于信息扩散与自助法的旱灾风险评估模型—以安徽为例[J]. 灾害学, 2015, 30(1): 228-235. (OU YANG Wei, YU Yan-qing, JIN Ju-liang, et al. Risk assessment model of drought disaster based on information diffusion and bootstrap A Case Study in Anhui[J]. Journal of Catastrophology, 2015, 30(1): 228-235. (in Chinese))
- [39] 宫德吉, 郝慕玲, 侯琼. 旱灾成灾综合指数的研究[J]. 气象, 1996, 22(10): 3-7. (GONG De-ji, HAO Mu-ling, HOU Qiong. Study on the complex Index of the Drought Disaster[J]. Meteorological Monthly, 1996, 22(10): 3-7. (in Chinese))
- [40] 曹升乐, 王艳玲, 俞如安. 山东省旱情评价预测方法研究[J]. 山东大学学报: 工学版, 2006, 36(2): 58-61. (CAO Sheng-le, WANG Yan-ling, YUN Ru-an. Study on drought assessment and forecast method of Shandong Province[J]. Journal of Shandong University of Technology, 2006, 36(2): 58-61. (in Chinese))
- [41] 石长金, 孙雪文, 汪星. 黑龙江省区域旱灾的综合统计分析[J]. 水土保持研究, 2006, 13(1): 160-161. (SHI Chang-jin, SUN Xue-wen, WANG Xing. Synthesis statistical analysis on regional drought in Heilongjiang Province[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2006, 13(1): 160-161. (in Chinese))
- [42] 石忆邵. 陕西省干旱灾害的成因及其时空分布特征[J]. 干旱区资源与环境, 1994, 8(3): 51-57. (SHI Yi-shao. Formation and temporal and spatial distribution of droughts in Shanxi[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 1994, 8(3): 51-57. (in Chinese))