

DOI:CNKI:61-1390/S.20111216.1150.025

网络出版时间:2011-12-16 11:50

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1390.S.20111216.1150.025.html>

基于集对分析的洪水危险性评价可变模糊识别模型

吴成国¹,王义民¹,唐言明²,黄 强¹,金菊良³

(1 西安理工大学 西北水资源与环境生态教育部重点实验室,陕西 西安 710048;

2 中海油山东化学工程有限责任公司,山东 济南 250013;3 合肥工业大学 土木与水利工程学院,安徽 合肥 230009)

[摘 要] 【目的】建立基于现代智能方法的洪水危险性评价模型,进一步提高评价精度,为制定区域防洪规划、实现洪水资源安全利用提供决策依据。【方法】鉴于可变模糊识别模型相对差异度函数构造困难、计算量大的不足,利用集对分析方法直接构造可变模糊识别模型相对差异度函数,进而通过确定指标权重,将洪水样本不同指标相对差异度综合为样本隶属度,建立基于集对分析的洪水危险性评价可变模糊识别模型,并将其应用于长江下游南京站历史洪水样本的等级评价中,实现对不同洪水样本危险等级的分类排序。【结果】实例应用表明,采用基于集对分析的洪水危险性评价可变模糊识别模型确定的洪水样本危险等级差异明显、分辨率高,与投影寻踪方法确定的洪水分类结果基本一致,有效避免了模型参数取值的主观随意性给评价结果带来的不确定性。【结论】基于集对分析的洪水危险性评价可变模糊识别模型计算过程简便、可行,结果稳健、可靠,在缺乏标准评价等级资料的复杂系统综合评价问题中具有一定的推广应用价值。

[关键词] 集对分析;可变模糊识别;洪水危险性评价;隶属度;洪水资源利用

[中图分类号] P333.2;TV213

[文献标识码] A

[文章编号] 1671-9387(2012)01-0221-06

Variable fuzzy recognition model for the flood hazard assessment based on Set Pair Analysis

WU Cheng-guo¹, WANG Yi-min¹, TANG Yan-ming², HUANG Qiang¹, JIN Ju-liang³

(1 Key Lab of Northwest Water Resources and Environment Ecology of MOE, Xi'an University of Technology, Xi'an,

Shaanxi 710048, China; 2 CNOOC Shandong Chemical Engineering Co. Ltd, Jinan, Shandong 250013, China;

3 College of Civil and Hydraulic Engineering, Hefei University of Technology, Hefei, Anhui 230009, China)

Abstract: 【Objective】The research was to establish the flood hazard assessment model based on model intelligent method, and further improve the evaluating precision, which can supply important decision basis for establishing the regional flood control programming and realizing the safe utilization of flood resources. 【Method】In view of the difficulties to establish the relative difference degree function and its large amount of calculation, the Set Pair Analysis method was used to establish the relative difference degree function directly for the variable fuzzy recognition method firstly, the relative difference degree of single index was synthesized into membership degree of the flood sample by determining the weight of evaluation indexes, and then the variable fuzzy recognition model for the flood hazard assessment based on Set Pair Analysis was established, which was applied in the grade assessment system for the historical flood samples of Nanjing Station in the lower of Yangtze River, and finally realized the classification and sorting for the hazard grade of flood samples. 【Result】The applying result shows that, the hazard grade of the flood samples de-

* [收稿日期] 2011-06-07

[基金项目] 国家重点基础研究发展计划项目(2011CB403306);国家公益性行业科研专项(201001012, 201101043, 201101049);国家自然科学基金项目(51079037)

[作者简介] 吴成国(1982—),男,甘肃民乐人,在读博士,主要从事水资源系统工程研究。E-mail: wule9825@163.com

terminated by the variable fuzzy recognition model for the flood hazard assessment based on Set Pair Analysis, consistent with the results calculated by the Projection Pursuit method, has obvious differences and higher resolving power, which effectively avoids the uncertainty of the results brought by the subjective and arbitrary of the parameter values. 【Conclusion】 The calculating process of the established model is simple and visual, and the calculating result is reasonable and reliable, so it would have a significant popularization and application prospect in the other assessment problem of complex system lacking of standard evaluation grade.

Key words: Set Pair Analysis; variable fuzzy recognition; flood hazard assessment; membership degree; safe utilization of flood resources

洪水危险性是指洪水灾害系统中孕灾环境和致灾因子的各种自然属性特征的概率分布,可用洪水过程强度和规模(如洪峰流量、洪峰水位、洪水历时、洪峰流速、洪量等)、洪水频率、洪水灾害影响范围等指标的概率分布来描述^[1-2]。洪水危险性评价的重要问题之一,就是如何根据洪水过程强度的不同指标将洪水分成特大洪水、大洪水、中等洪水和小洪水等不同等级类型,为洪水灾害风险管理提供可靠的决策依据^[2-3]。洪水危险性评价的实质,就是通过建立合理的综合评价模型,同时兼顾多目标评价系统中不同指标的重要性程度,将多个洪水危险性指标综合成一单指标形式,在一维实数空间内实现对洪水危险性的分类和排序^[2-4]。李吉顺等^[4]根据各省区历史暴雨洪涝灾害灾情资料,研究构建了以“综合危险度”和“相对危险度”为主要内容的洪水危险性评价方法。闵赛^[5]从洪水过程的能量转换角度出发,提出了基于洪峰水位的洪水分类模型。何报寅等^[6]利用 ARC/INFO 地理信息系统平台强大的空间分析和叠加功能,提出了基于 GIS 技术的湖北省洪水危险性评价模型。黄诗峰等^[7]从河网密度与洪水危险性的相关关系出发,提出了利用 GIS 技术提取河网密度,从而实现洪水危险性评价的新途径。毛德华^[8]则从分析洪涝危险性的形成机制出发,提出了定性分析和定量计算相结合的洪涝危险性评价新方法。但洪水危险性评价系统是包含众多随机、模糊及未确知信息的复杂大系统,现有评价方法建模复杂,且不能全面反映复杂系统具有的数据结构特征。可变模糊识别模型^[9-11]作为传统模式识别理论的广义模型,为分析复杂不确定系统提供了一种研究途径。可变模糊识别模型应用的关键是指标相对差异度函数的构建,为此,本研究利用集对分析方法^[12-13]构建洪水评价样本单指标差异度函数,通过指标权重将单指标差异度转化为样本隶属度^[13-15],进而实现对洪水危险性评价的分类和排序,建立了

基于集对分析的洪水危险性评价可变模糊识别模型,并将上述模型在长江下游南京站历史洪水危险性评价系统中开展了实例研究,以期制定和实施区域防洪规划方案提供参考依据。

1 基于集对分析的可变模糊识别模型的建立

1.1 集对分析

集对分析(Set Pair Analysis, SPA)是由我国学者赵克勤先生^[12]于 1989 年提出的一种不确定系统分析方法。其核心是承认客观事物存在的不确定性,并将确定性与不确定性作为一个集合,从同、异、反 3 个方面对客观事物加以定量描述。集对分析的关键是如何合理确定客观实物不同特征的同、异、反联系度,目前联系度确定的方法有穷举法、逐步分析法、最大最小法及比例法等^[12]。作为对可变模糊集理论的推广,集对分析拓展了模糊集理论在水文水资源领域的研究范围,为复杂大系统不确定性分析提供了一种新的研究途径。

1.2 可变模糊识别

模糊识别是根据研究对象的特征或属性,运用一定的分析算法及计算程序,采取定性研究和定量计算相结合的方法,确定研究对象所处的类别或等级^[9-10]。可变模糊识别模型是一个动态变化模型,通过设置模型不同参数的多种组合情况,从广义角度上揭示研究对象不确定性与确定性之间的相互转化关系。如当优化准则 $\alpha=1$ 、距离参数 $p=2$ 时,可变模糊识别模型即为理想点模型;当 $\alpha=1$ 、 $p=1$ 时,可变模糊识别模型即为模糊综合评判模型;当优化准则 $\alpha=2$ 、距离参数 $p=1$ 时,可变模糊识别模型即为神经网络神经元非线性特征的 Sigmoid 激励函数;当优化准则 $\alpha=2$ 、距离参数 $p=2$ 时,可变模糊识别模型即为模糊优选模型^[9]。可见,可变模糊识别理论是对传统模糊集理论的进一步推广,也是对

传统模糊模式识别理论的深入和完善。

1.3 模型建立过程

基于集对分析的洪水危险性评价可变模糊识别模型建立的关键,是利用集对分析方法构造可变模糊识别模型的相对差异度函数。最后,通过计算方案综合隶属度,根据“隶属度越大、危险性越大”的原则,进行洪水样本的分类排序。模型建立过程包括如下 4 个步骤:

Step 1:建立评价样本集,对评价指标进行优劣排序。根据研究区域洪水危险性评价系统的具体情况,从系统性和实用性角度建立洪水危险性评价指标体系,记为 $\{x_{ij} | i=1,2,\dots,n; j=1,2,\dots,m\}$,其中 i 和 j 分别为样本序号和指标序号, n 和 m 分别为样本总数和指标总数。根据评价系统不同指标的作用方向,对其进行优劣排序。由此可得样本集理想“最优”及“最劣”样本,即理想点和反理想点,分别记为 $\{s_j | j=1,2,\dots,m\}$ 和 $\{t_j | j=1,2,\dots,m\}$ ^[9,13]。

Step 2:用 SPA 计算不同样本与理想点之间的单指标差异度 u_{ij} ^[13]。根据对立统一的辩证原理,若赋予对立双方的性质分别为 A (吸引力性质)和 A^c (排斥性质),则将样本指标值 x_{ij} 对于性质 A 的相对差异度记为 v ,将其对于性质 A^c 的相对差异度记为 v^c 。事物发生渐变式质变的概念为:样本指标数据 x_{ij} 对性质 A 的相对差异度 v 与对性质 A^c 的相对差异度 v^c 达到动态平衡,即 $v=v^c$ ^[9]。在数学上表示为:设某论域上的模糊事物,以 A 与 A^c 分别表示其对立的吸引与排斥性质,则论域上的任意元素对吸引与排斥性的相对差异度分别为 v 和 v^c ,且满足 $v+v^c=1, v \in [0,1], v^c \in [0,1]$ 。本研究提出用 SPA 直接计算样本指标值 x_{ij} 对性质 A 的相对差异度 u ,则其对于性质 A^c 的相对差异度 $u^c=1-u$ ^[9]。集对分析的核心是将系统的确定性与不确定性特征予以辩证分析与数学处理,并从同、异、反 3 个方面阐明事物特征在变化条件下的转变关系。式(1)为 SPA 联系度计算公式^[13]:

$$u=a+bi+cj. \quad (1)$$

式中: a, b 和 c 分别为同一度、差异度和对立度,非负且满足 $a+b+c=1$; i 为差异度系数, $i \in [-1,1]$,随着 i 从两端逐渐接近于 0,表示系统特性逐步由确定性向不确定性转化; j 为对立度系数, $j \in [-1,1]$,恒取 -1 。为了评价洪水样本与理想点的接近程度,将洪水样本 i 指标 j 的指标值 x_{ij} 与(反)理想点对应指标值作为一个集对,按照它们的接近程度进行同、异、反方面的定量分析^[12]:若样本指标值 x_{ij}

与理想点对应指标值 s_j 相等,则 $u_{ij}=1$;若样本指标值 x_{ij} 与反理想点对应指标值 t_j 相等,则 $u_{ij}=0$;否则 $u_{ij} \in [0,1]$ 。具体计算公式如下^[13]:

$$u_{ij} = \begin{cases} 1, x_{ij} = s_j; \\ (x_{ij} - t_j) / (s_j - t_j), t_j < x_{ij} < s_j; \\ 0, x_{ij} = t_j. \end{cases} \quad (2)$$

式中: s_j 为理想点指标值, t_j 为反理想点指标值。与文献[9]、[10]相比,式(2)利用 SPA 直接构造可变模糊识别相对差异度函数的方法计算过程简便;文献[9]、[10]在构造相对差异度函数时,需要根据实际评价问题的物理分析和评价者经验确定可变吸引域与量变域,计算过程比较复杂。

Step 3:计算评价样本隶属于模糊集“理想点”的综合隶属度 v_i 。若样本 i 与理想点的差异性越大,则 v_i 越接近于 0,样本 i 越倾向于不隶属于理想点;若样本 i 与理想点的同一性越大,则 v_i 越接近于 1,样本 i 越倾向于隶属于理想点。样本 i 隶属于模糊集“理想点”的综合隶属度公式为^[9]:

$$v_i = \frac{1}{1 + \left(\frac{d_g}{d_b}\right)^\alpha}, (i=1,2,\dots,n). \quad (3)$$

式中: α 为优化准则参数,取 1 或 2; $\alpha=1$ 为最小一乘方准则, $\alpha=2$ 为最小二乘方准则; d_g 为评价样本与理想点之间的相对差异程度; d_b 为评价样本与反理想点之间的相对差异程度。

d_g 和 d_b 的计算公式如下^[9,12]:

$$d_g = \left\{ \sum_{j=1}^m \{w_j [1 - u_{ij}]^p\}^{\frac{1}{p}}, (i=1,2,\dots,n) \right\}; \quad (4)$$

$$d_b = \left\{ \sum_{j=1}^m \{w_j [1 - u_{ij}]^p\}^{\frac{1}{p}} \right\} = \left\{ \sum_{j=1}^m [w_j u_{ij}]^p \right\}^{\frac{1}{p}}, \quad (i=1,2,\dots,n). \quad (5)$$

式中: p 为距离参数, $p=1$ 为海明距离, $p=2$ 为欧式距离; w_j 为不同评价的指标权重,且满足 $\sum_{j=1}^m w_j=1$ 。权重计算可采用基于二元判断矩阵的层次分析法等主观赋权法、基于评价样本数据驱动的投影寻踪客观赋权法^[2]及主客观组合赋权法确定^[14];

Step 4:对洪水样本进行评价排序。基于 Step 3 计算所得评价样本的综合隶属度值 v_i ,根据“综合隶属度越大,洪水危险性越大”的原则,按综合隶属度 v_i 值从大到小排序,即可对评价样本集不同洪水过程的危险性程度进行分类排序。

2 应用实例

2.1 基本资料

中国是一个水患灾害频发的国家,洪水灾害风

险管理是流域水资源合理配置及洪水资源安全利用的一项重要措施,区域洪水危险性及灾情评价是洪水灾害风险管理研究的重要内容,在防灾减灾实践研究中发挥着重要作用^[2]。城市作为人口、经济、社会高度集中的承灾体,其特性与农村有着本质的区别。人口和社会财产越密集的区域,洪水灾害的危险性就越大。河网是城市洪水灾害危险性评价的重点考察对象,离河道越近的地方,洪水冲击力越强,同时遭受洪水侵害的可能性越大;另外,不同级别的

河流其影响范围是不同的,干流较一级支流、一级支流较二级支流具有更强的影响力;同时,河网越复杂,水域越破碎,洪水灾害的危险性程度就越高^[3]。表 1 给出了长江下游南京站历年 10 次洪水过程的 5 个评价指标(分别为洪峰水位、水位超 9 m 天数、大通水文站洪峰流量、5—9 月洪量及流量历时综合指标)的数据资料。现根据前文建立的洪水危险性评价模型,对基于集对分析的洪水危险性评价可模糊识别模型的应用过程予以详细阐述。

表 1 长江下游南京站历史洪水过程评价指标数据^[2]

Table 1 Historical flood assessment data of the Nanjing Station in the lower of Yangtze River^[2]

年份 Year	洪峰水位/m Flood peak level	水位超 9 m 天数/d Days for the water level above 9 m	大通洪峰流量/ (m ³ · s ⁻¹) Peak discharge for Datong	5—9 月洪量/m ³ Flood volume from May to September	流量历时综合指标 Synthesized index for flow and time
1954	10. 22	87	92 600	8 891	7 800
1969	9. 20	8	67 700	5 447	1 710
1973	9. 19	7	70 000	6 623	3 280
1980	9. 20	10	64 000	6 340	2 730
1983	9. 99	27	72 600	6 641	3 560
1991	9. 70	17	63 800	5 576	1 930
1992	9. 06	13	67 700	5 295	1 575
1995	9. 66	23	75 500	6 162	2 390
1996	9. 89	34	75 100	6 206	2 702
1998	10. 14	81	82 100	7 773	5 283

2.2 计算过程

南京位于长江中下游流域,洪水资料丰富,同时遭受洪水侵蚀的可能性也较大。表 1 给出的南京站历时洪水过程样本集的 5 个评价指标均为正向指标,首先按式(2)对样本集指标数据进行标准化处理,然后采用投影寻踪法^[2]计算得评价系统不同指标的权重向量为 $w_i=(0.173\ 0,0.233\ 5,0.190\ 1,0.194\ 5,0.208\ 9)$ 。最后,依据式(3)、(4)、(5),取优化准则参数 $\alpha=1$ 、距离参数 $p=1$ 和优化准则参数 $\alpha=1$ 、距离参数 $p=2$ 时的 2 种组合情况,计算得

南京站历史 10 场洪水过程危险性评价综合隶属度结果如表 2 所示。同时,与文献[2]相比,两种方法计算结果对应的不同洪水样本危险性评价隶属度的散点分布如图 1 所示。由图 1 可见,由于模型参数权向量的不断变换,2 种参数组合情况下同一洪水过程危险性隶属度的差异不大,基本保持在各自稳定的量变域内。为此,取 2 种参数组合情况下同一洪水过程的危险性隶属度均值 $\bar{v}_i$ 作为其最终隶属度值,同时按隶属度值从大到小进行排序,所得结果如表 2 所示。

表 2 南京站历史洪水过程危险性评价的综合隶属度及其排序

Table 2 Membership degree and its sorting results for the historical flood risk assessment of Nanjing Station

项目 Item	参数取值 Parametre value	1954	1969	1973	1980	1983	1991	1992	1995	1996	1998
隶属度 Membership degree	$\alpha=1, p=1$	1. 000 0	0. 062 3	0. 189 4	0. 126 2	0. 394 6	0. 151 7	0. 043 3	0. 287 6	0. 364 3	0. 756 3
	$\alpha=1, p=2$	1. 000 0	0. 075 4	0. 215 8	0. 154 0	0. 339 4	0. 205 3	0. 067 5	0. 294 7	0. 369 6	0. 732 8
综合隶属度 Synthesized membership degree		1. 000 0	0. 068 9	0. 202 6	0. 140 1	0. 394 5	0. 178 5	0. 055 4	0. 291 2	0. 367 0	0. 744 6
排序序号 Sorting number		1	9	6	8	3	7	10	5	4	2

2.3 评价结果分析

由图 1 及表 2 计算结果可以看出:(1)按照历史洪水样本危险性评价的隶属度从大到小排序,年份依次为 1954,1998,1983,1996,1995,1973,1991,1980,1969 和 1992,这一结果与根据洪水强度大小

的排序结果基本一致。若按照传统的特大洪水、大洪水、中等洪水和小洪水的四级标准划分,1954,1998 年属于同一级洪水,可判为特大洪水,但洪水强度以 1998 年小于 1954 年;1983,1996 和 1995 年属于同一级洪水,可判为大洪水;1973,1991 年属于

同一级洪水,可判为中等洪水;1980,1969 和 1992 年属于同一级洪水,可判为小洪水。

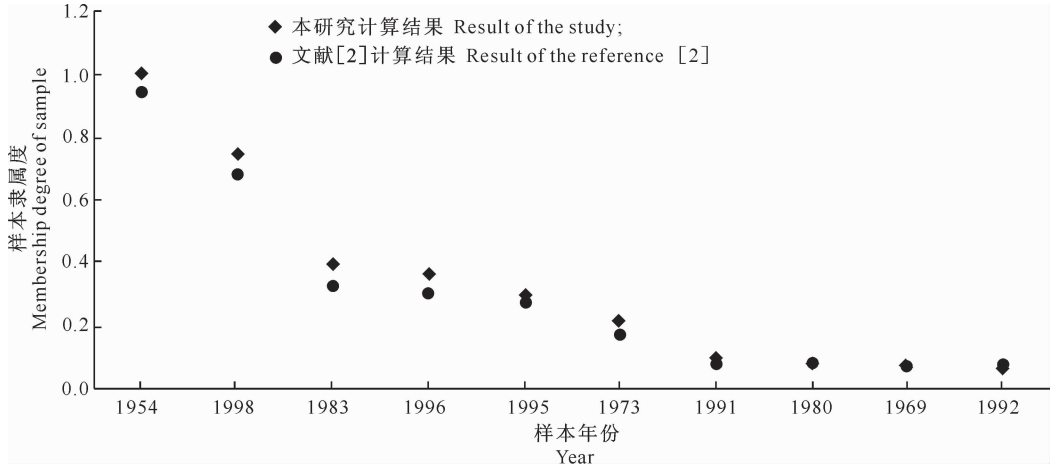


图 1 长江下游南京站历史洪水样本危险性评价隶属度的散布图

Fig. 1 Distribution of the membership degree for the flood hazard assessment of Nanjing Station in the lower of Yangtze River

(2)上述洪水危险性评价排序结果,与文献[2]基于投影寻踪的洪水危险性分类方法的计算结果基本一致。但基于样本数据驱动的投影寻踪方法计算量大,在一定程度上限制了该方法的深入应用,而基于集对分析的可变模糊识别方法计算过程简便、直观,可得到原始样本数据集的自然分类。文献[2]中,利用投影寻踪聚类方法计算结果判断,洪水强度以 1992 年大于 1969 年,而由表 1 数据可以看出,5 个评价指标中只有“洪水水位超 9 m 天数”1 个指标以 1992 年略大于 1969 年,“大通洪峰流量”指标 1992 年等于 1969 年,其余 3 个指标均是 1969 年大于 1992 年。可见,事实上 1969 年洪水强度应略大于 1992 年洪水强度。

(3)本研究计算结果与文献[2]基于遗传算法的投影寻踪聚类评价模型的计算结果存在一定差异,这主要是由于投影寻踪聚类评价方法中窗口半径参数 R 取值的多样性直接影响着计算结果;而基于集对分析的可变模糊识别方法属于非参数评价方法,避免了参数取值的主观随意性给评价结果带来的不确定性。

3 结 论

洪水危险性评价的关键是如何将洪水过程的多个危险性评价指标科学、合理地综合成一单指标形式,进而在一维空间中对洪水危险性进行分类排序。为综合考虑洪水危险性评价系统的众多随机、模糊、未确知等不确定性,在洪水危险性评价指标及样本体系建立的基础上,本研究利用集对分析方法计算

洪水样本单指标差异度函数,建立了基于集对分析的洪水危险性评价可变模糊识别模型。在长江下游南京站历史洪水样本危险性评价系统的实例应用结果表明,本研究建立的评价模型计算简便、可行,结果稳健、可靠,在缺乏标准评价等级资料的复杂大系统综合评价问题中,具有一定的推广应用价值。

[参考文献]

[1] 魏一鸣,金菊良,周成虎,等. 洪水灾害评估体系研究 [J]. 灾害学,1997,12(3):1-5.
Wei Y M, Jin J L, Zhou C H, et al. A study on the system of flood disaster estimation [J]. Journal of Catastrophology, 1997,12(3):1-5. (in Chinese)

[2] 魏一鸣,金菊良,杨存建,等. 洪水灾害风险管理理论 [M]. 北京:科学出版社,2007.
Wei Y M, Jin J L, Yang C J, et al. Theory of risk management of flood disaster [M]. Beijing: Science Press, 2007. (in Chinese)

[3] 王静爱,王 珏,叶 涛. 中国城市水灾危险性与可持续发展 [J]. 北京师范大学学报:社会科学版,2004,48(3):138-143.
Wang J A, Wang J, Ye T. Hazard assessment of urban flood disaster and sustainable development in China [J]. Journal of Beijing Normal University: Social and Science Edition, 2004, 48 (3): 138-143. (in Chinese)

[4] 李吉顺,冯 强,王昂生. 我国暴雨洪涝灾害的危险性评估:台风、暴雨灾害性天气监测预报技术研究 [M]. 北京:气象出版社,1996.
Li J S, Feng Q, Wang A S. The hazard assessment for the rain-storm and flood disaster in China: Monitoring and prediction technique research for the disastrous weather of typhoon, rain-storm [M]. Beijing: China Meteorological Press, 1996. (in Chinese)

[5] 闵 赛. 洪险度及其灾害学意义 [J]. 灾害学,1996,11(2):80-

85.
Min S. Flood risk degree and its disaster meanings [J]. Journal of Catastrophology,1996,11(2):80-85. (in Chinese)

[6] 何报寅,张海林,张 穗,等. 基于 GIS 的湖北省洪水灾害危险性评价 [J]. 自然灾害学报,2002,11(4):84-89.
He B Y,Zhang H L,Zhang S,et al. GIS-based risk evaluation for flood disaster in Hubei Province [J]. Journal of Natural Disasters,2002,11(4):84-89. (in Chinese)

[7] 黄诗峰,徐 美,陈德清. GIS 支持下的河网密度提取及其在洪水危险性分析中的应用 [J]. 自然灾害学报,2001,10(4):129-132.
Huang S F,Xu M,Chen D Q. GIS-based extraction of drainage network density and its application to flood hazard analysis [J]. Journal of Natural Disasters,2001,10(4):129-132. (in Chinese)

[8] 毛德华. 洞庭湖区洪涝危险性综合评价与分析 [J]. 自然灾害学报,2001,10(4):104-107.
Mao D H. Comprehensive assessment and analysis on the risk degree of flood-waterlogging in Dongting Lake region [J]. Journal of Natural Disasters,2001,10(4):104-107. (in Chinese)

[9] 陈守煜,郭 瑜. 模糊可变集合及其在防洪工程体系综合风险评价中的应用 [J]. 水利水电科技进展,2005,25(6):4-8.
Chen S Y,Guo Y. Variable fuzzy sets and their application to comprehensive risk evaluation for flood control engineering system [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2005,25(6):4-8. (in Chinese)

[10] 陈守煜. 水资源与防洪系统可变模糊集理论与方法 [M]. 辽宁大连:大连理工大学出版社,2005.
Chen S Y. Theories and methods of variables fuzzy sets in water resources and flood control system [M]. Dalian,Liaoning: Dalian University of Technology Press,2005. (in Chinese)

[11] 王文圣,李跃清,秦宁生. 基于集对分析的洪水分类研究 [J]. 高原山地气候研究,2009,29(1):51-54.
Wang W S,Li Y Q,Qin N S. Study on flood classification based on Set Pair Analysis [J]. Plateau and Mountain Meteorology Research,2009,29(1):51-54. (in Chinese)

[12] 赵克勤. 集对分析及其初步应用 [M]. 浙江杭州:浙江科学技术出版社,2000.
Zhao K Q. Set Pair analysis and its initial application [M]. Hangzhou,Zhejiang: Zhejiang Science and Technology Press,2000. (in Chinese)

[13] 田水承,王 莉,李红霞. 基于 SPA 模型的煤矿瓦斯危险源风险评价 [J]. 安全与环境学报,2006,6(6):103-106.
Tian S C,Wang L,Li H X. Application of risk evaluation in coalmine gas hazard based on model of SPA [J]. Journal of Safety and Environment,2006,6(6):103-106. (in Chinese)

[14] 范如国,王志武. 熵权理想点法及其在投资决策中的应用 [J]. 武汉水利电力大学学报,1998,31(6):105-107.
Fan R G,Wang Z W. A method of entropy weighting ideal point and its application in investment decision [J]. Journal of Wuhan University of Hydraulic and Electrical Engineering,1998,31(6):105-107. (in Chinese)

[15] Lu H J,Chen Y C. The grey clustering method of the evaluation of flood severity [C]//Proceedings of International Symposium on Floods and Droughts. Nanjing,Jiangsu:Hohai University Press,1999:72-77.