

DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdtqk.2015.01.005

基于系统多层次灰色模型的洪灾风险综合评价方法 —以鄱阳湖流域为例

徐镇凯, 黄海鹏, 魏博文, 刘成林

(南昌大学 建筑工程学院, 南昌 330031)

摘要: 洪水灾害风险评价是一个多因素协同影响效应的系统过程。在分析洪水风险系统的基础上, 并从洪水风险评估的角度, 综合考虑了致灾因子, 孕灾环境和承灾体的相关因素, 构建了洪水灾害风险综合评价体系, 融合灰色聚类法与层次分析的数据处理优势, 提出了适应洪水灾害风险预测的系统多层次灰色综合评价方法。以鄱阳湖流域为例, 通过定性分析与定量分析相结合, 对鄱阳湖流域洪水风险系统进行了综合评价, 为流域内洪水灾害风险综合评价提供了参考依据。

关键词: 洪水风险; 综合评价; 层次分析; 灰色聚类法; 定性; 定量; 鄱阳湖流域

中图分类号: TV8 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-1683(2015)01-0020-04

Comprehensive evaluation method of flood risk based on multi-level gray system model — a case study in Poyang Lake Basin

XU Zhen kai, HUANG Hai peng, WEI Bo wen, LIU Cheng lin

(College of Civil Engineering, Nanchang University, Nanchang 330031, China)

Abstract: Flood risk assessment is a systematic process with the synergy effects between multiple factors. Based on the analysis of flood risk system, a comprehensive flood risk assessment system was constructed in consideration of the factors including the disaster inducing factors, disaster inducing environment, and disaster bearing body from the perspective of flood risk evaluation. The data processing advantages of gray clustering method and analytical hierarchy process(AHP) were integrated and a comprehensive evaluation method of multi-level gray system was proposed to adapt the flood disaster risk prediction. The method was applied in the Poyang Lake Basin. The combination of qualitative and quantitative analysis of the flood risk system in the Poyang Lake Basin can provide reference for the comprehensive evaluation of flood risk in the basin.

Key words: flood disaster risk; comprehensive evaluation; AHP; gray clustering method; qualitative; quantitative; Poyang Lake Basin

据相关资料统计^[1], 现有自然灾害中洪灾是最具影响灾害之一, 严重危害社会和谐及地区经济的健康发展。为此, 有必要对流域洪灾风险进行科学评估, 建立适应于流域范围内洪水风险评价模型。目前关于洪水灾害风险评价的研究成果较多^[2], 如陈香^[3]选取暴雨致灾因子危险性、承灾体潜在易损性和区域防灾减灾3个指标, 构建了一个未考虑孕灾环境因素影响的区域暴雨洪灾风险评价模型; 詹小国^[4]等针对平原地形的特点, 综合评价了过境洪水和本地洪水的危险性及其承灾体的易损性和抗灾能力, 运用GIS建立了平原地区洪灾风险评价模型。同时, GIS技术^[5]、模糊数学^[6]、层次分析^[7]等手段也被用于洪水灾害风险评价。然而, 区域范围内

洪水灾害风险的动因及响应项受诸多不确定性因素影响, 而且地理遥感信息本身也存在一定的多重性与不确定性^[6], 致使其有效数据序列较短、资料缺乏及多效应项信息重复, 因此现行评价方法难以进行合理有效地评判, 迫切需要建立一种基于多源信息融合的分析方法来评估区域内洪灾风险。

本文拟采用融合层次分析与灰色聚类法对洪水灾害风险进行分析与定量评价, 该方法符合洪灾风险综合评价体系受不同复杂评价因素影响本身存在多层次评价目标结构, 可弥补原始资料少、信息的贫乏的现象, 不仅可以减少传统评价方法主观因素的影响, 而且具有高度的逻辑性、灵活性及简洁性, 可有效解决类似多因素、多层次、非量化条件下的

收稿日期: 2014-06-03 修回日期: 2014-11-03 网络出版时间: 2014-12-03
网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20141203.1338.013.html>
基金项目: 国家自然科学基金(41261053)
作者简介: 徐镇凯(1956), 男, 江苏人, 教授, 主要从事水利水电工程教学与研究工作。E-mail: XZKncu@126.com

评价问题,从而准确反映洪水灾害风险状态,对加强洪水风险管理、改善洪水灾害风险评估现状等也具有一定的现实意义。

1 洪水灾害风险综合评价指标体系的建立

通常洪水灾害系统由致灾因子、孕灾环境、承灾体共同组成,而风险是这个系统中各因素互相作用的产物^[8]。洪水灾害的致灾因子包含有暴雨、台风、溃堤、波浪等,其中暴雨是首要的致灾因子^[9]。孕灾环境主要包括大气环流,下垫面环境以及水文气象环境^[2],事实上,局部范围的洪水灾害主要受下垫面环境影响,而不是大气及水文环境。因此,本文选取地形、河网密度、土地利用、植被等作为孕灾环境的评价因子。承灾体则为致灾因子作用的对象,是人类社会及各种资源的集合^[8],因此,本文将人均GDP、人口密度、农业、房屋等作为承灾体的评价因子。

我国地域辽阔,自然条件和社会经济条件多样,因此不同区域洪水灾害风险的评价因子不尽相同,故本文在指标层中加入“其他”项,以便不同区域结合自身自然经济条件选取重要因子作为指标层因素进行评价。在综合国内外洪水灾害风险评价的基础上,利用层次分析法选取重要指标建立了针对孕灾环境、致灾因子、承灾体三方主体的综合评价体系,见图1。

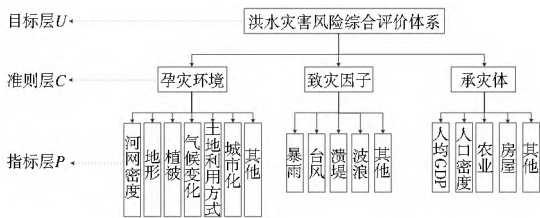


图1 综合评价指标体系

Fig. 1 Comprehensive evaluation index system

2 多层次灰色综合评价模型

洪水风险体系指标众多,层次分析法有利于从不同层次对系统因素进行分类^[10],但不能表达系统因素之间的关联性,而灰色聚类法恰好弥补其不足^[11]。灰色聚类分析可将聚类对象对于不同的聚类指标所拥有的白化数,按几个灰类进行归纳,通过计算所有指标的综合效果,判断聚类对象所属类型^[12]。结合层次分析与灰色聚类构建的多层次灰色综合评价模型适用于机制复杂、层次较多的综合评价工作中,能够在缺资料、少信息条件下完成建模、预测和决策,将评价专家的分散信息处理成一个描述不同灰类程度的权向量并进行单值化处理,从而可得到受评洪水灾害风险体系的综合评价值和洪水灾害风险等级划分。

2.1 模型的求解过程

本文将层次分析与灰色聚类法相结合,在确定评价指标权重时采用层次分析法,再应用灰色聚类分析法,从而极大地发挥了这两种方法的优势,其步骤如下。

(1) 运用层次分析法确定评价指标的权重。

依据层次分析法将评价体系中各层指标按标度取值范围^[13]进行两两比较,构造由因数集 V 、 U 得到的判断矩阵,用

方根法求最大特征根及其对应的特征向量,即各指标权重。当 $C_R = C_l/R_l < 0.1$ (C_R 为随机一致性比率, C_l 为判别矩阵的一致性指标, $C_l = \lambda_{\max} - n/(n-1)$; n 为判别矩阵的阶数; R_l 为判别矩阵的平均随机一致性,取值见表1)时,即认为判断矩阵具有满意一致性,否则就需要调整判断矩阵使之具有满意的一致性^[14]。

表1 平均随机一致性 R_l 指标值

Tab. 1 Values of mean random consistency index

判断矩阵维数	1	2	3	4	5	6
R_l	0	0	0.56	0.90	1.12	1.25

(2) 确定评价标准及样本矩阵。

将评价指标等级划分为低、较低、中、高,对应的分值为4、3、2、1。分值越高,风险状态越低,介于两者之间取中间值。而对于样本矩阵,则采用专家打分法,组织 P 位专家依据评价规则对洪水灾害风险指标进行评价并给出评分,第 K 个评价者对指标 V_{ij} 给出的评分记为 d_{ijk} 。明显不合理的打分子以淘汰,合理的则保留。

(3) 确定评价灰类。

灰色聚类中的灰数是指知道大概范围区间而不知道其确切值的数,即数集^[15]。评价灰类的确定就是确定评价灰类的等级数、灰类的灰数及灰数的白化函数。为了更加准确地对洪水灾害风险状况进行综合评价,本文将灰类分成4个等级,分别为低、较低、中、高,其相应的灰数和白化权函数见表2。

表2 相应的灰类描述及白化权函数

Tab. 2 Corresponding gray description and whitening weight function

评价灰类	描述	白化权函数
1	风险评价:低 灰数 $\theta_1 \in [4, \infty]$	$f_1(d_{ijk}) = \begin{cases} d_{ijk}/4 & d_{ijk} \in [0, 4] \\ 0 & d_{ijk} \in (4, \infty] \\ 0 & d_{ijk} \in (-\infty, 0] \end{cases}$
2	风险评价:较低 灰数 $\theta_1 \in [0, 3, 6]$	$f_2(d_{ijk}) = \begin{cases} d_{ijk}/3 & d_{ijk} \in [0, 3] \\ (6-d_{ijk})/3 & d_{ijk} \in (3, 6] \\ 0 & d_{ijk} \in (-\infty, 0) \cup (6, +\infty) \end{cases}$
3	风险评价:中 灰数 $\theta_1 \in [0, 2, 4]$	$f_3(d_{ijk}) = \begin{cases} d_{ijk}/2 & d_{ijk} \in [0, 2] \\ (4-d_{ijk})/2 & d_{ijk} \in (2, 4] \\ 0 & d_{ijk} \in (-\infty, 0) \cup (4, +\infty) \end{cases}$
4	风险评价:高 灰数 $\theta_1 \in [0, 1, 2]$	$f_4(d_{ijk}) = \begin{cases} 1 & d_{ijk} \in [0, 1] \\ 2-d_{ijk} & d_{ijk} \in (1, 2] \\ 0 & d_{ijk} \in (-\infty, 0) \cup (2, +\infty) \end{cases}$

(4) 计算灰色评价系数及评价权向量。

对于评价指标 V_{ij} ,则有

$$X_{ije} = \sum_{k=1}^P f_e(d_{ijk}) \quad (1)$$

指标层 V_{ij} 属于各个评价灰类的总灰色评价系数为

$$X_{ije} = \sum X_{ije} \quad e \in [1, 4] \quad (2)$$

对于评价权向量,所有 P 位专家就评价指标 V_{ij} 主张第 e 个灰类的灰色评价权向量,记为

$$r_{ije} = X_{ije}/X_{ij} \quad (3)$$

由于评价类有 4 类, 便有受评者 U_i 的评价指标 V_{ij} 对于各灰类评价权向量 $r_{ij} = (r_{ij1}, r_{ij2}, r_{ij3}, r_{ij4})$, 进而得到受评者 U_i 所属指标 V_{ij} 对于各评价灰类的灰色评价权矩阵 R_i

$$R_i = \begin{bmatrix} r_{ij1} \\ r_{ij2} \\ \vdots \\ r_{ijn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_{ij11} & r_{ij12} & r_{ij13} & r_{ij14} \\ r_{ij21} & r_{ij22} & r_{ij23} & r_{ij24} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ r_{ijn1} & r_{ijn2} & r_{ijn3} & r_{ijn4} \end{bmatrix} \quad (4)$$

(5) 对作综合评价。

对受评对象 U_i 的 V_{ij} 作综合评价, 其评价结果记为 B_i , 则有

$$B_i = A_i R_i = (b_{ij1}, b_{ij2}, b_{ij3}, b_{ij4}) \quad (5)$$

由评价结果 B_i 得所属 V 指标层 U_i 对于各评价灰类的灰色评价权矩阵 $R = (B_1, B_2, B_3)$ 。于是, 对受评对象 X 作综合评价, 其评价结果记为 B , 则有

$$B = AR = (b_1, b_2, b_3, b_4) \quad (6)$$

设各评价灰类等级按“灰水平”赋值, 可得到各级评价灰类等值向量 C , C 值为 4、3、2、1 时表示灰类等级分别为低、较低、中、高, 由此计算洪水灾害风险综合评价值:

$$Y = BC^T \quad (7)$$

对比评价指标评分等级的低、较低、中、高 4 个评分区间, 最终得到洪水灾害风险的评价结论。

2.2 综合评价流程

洪水灾害风险综合评价流程见图 2。

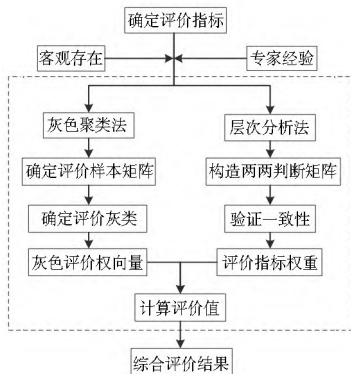


图 2 综合评价流程

Fig. 2 Comprehensive evaluation process

3 实例验证

鄱阳湖流域是我国最大的淡水湖泊, 流域面积 16.22 万 km^2 , 约占长江流域面积的 9%。自古以来鄱阳湖区就是长江中下游洪水灾害的频发区和重灾区。

依据洪水灾害风险综合评价体系(图 1), 结合鄱阳湖流域洪水灾害风险特点, 建立了鄱阳湖流域洪水灾害风险评价体系并选定评价指标, 运用层次分析法分别计算准则层和指标层权重, 详细计算结果见表 3。

在评价过程中, 邀请 5 位相关领域专家按照评价标准对洪水灾害风险指标进行评分, 评分结果见表 4。

对评价指标 V_{ij} , 按式(1)由白化权函数(表 2)得到属于第 e 个评价灰类的灰色评价系数 X_{11e} 计算结果见表 5。

依据式(2), 得出评价指标 V_{11} 属于各个评价灰类的总灰

表 3 鄱阳湖洪水灾害风险综合评价指标权重计算结果

Tab. 3 Weights of comprehensive evaluation indexes of the flood disaster risk in the Poyang Lake Basin

目标层	准则层	w_1	指标层	w_1
孕灾环境 U_1	0.333	0.333	河网密度 V_{11}	0.134
			地形 V_{12}	0.175
			植被 V_{13}	0.095
			气候变化 V_{14}	0.127
			土地利用方式 V_{15}	0.187
			城市化 V_{16}	0.187
			地面沉降 V_{17}	0.095
鄱阳湖流域洪水灾害风险 X	0.333	0.333	暴雨 V_{21}	0.310
			台风 V_{22}	0.087
			五河和长江来水 V_{23}	0.310
			波浪 V_{24}	0.089
			溃堤 V_{25}	0.204
承灾体 U_3	0.333	0.333	人均 V_{31}	0.237
			人口密度 V_{32}	0.296
			农业 V_{33}	0.203
			房屋 V_{34}	0.169
			提防工程 V_{35}	0.095

表 4 指标评分及灰色权向量汇总

Tab. 4 Index scores and gray weight vectors

V_{ij}	专家					灰色评价权向量			
	1	2	3	4	5	r_{ij1}	r_{ij2}	r_{ij3}	r_{ij4}
V_{ij11}	3	3	3.5	3.5	3	0.3748	0.4375	0.1875	0
V_{ij12}	3.5	3	3.5	3.5	4	0.4468	0.4255	0.1276	0
V_{ij13}	2.5	1.5	2	1.5	3	0.2531	0.3373	0.3133	0.0963
V_{ij14}	3.5	4	4	3.5	4	0.5327	0.4113	0.0560	0
V_{ij15}	2.5	2	2.5	2.5	3	0.3426	0.3460	0.3114	0
V_{ij16}	2.5	2	3	2	3	0.2830	0.3774	0.3396	0
V_{ij17}	3.5	3.5	3	4	3.5	0.4468	0.4255	0.1277	0
V_{ij21}	3	2	3	2.5	3.5	0.3000	0.4429	0.2571	0
V_{ij22}	4	4	3.5	3.5	4	0.5237	0.4113	0.0560	0
V_{ij23}	3	2	2.5	2	2.5	0.2728	0.3636	0.3636	0
V_{ij24}	4	4	3.5	4	4	0.5653	0.4058	0.0289	0
V_{ij25}	3	3	2.5	3	3.5	0.3723	0.4088	0.2189	0
V_{ij31}	3	3.5	3.5	3	4	0.4215	0.4298	0.1487	0
V_{ij32}	3.5	3.5	3	4	4	0.4737	0.4211	0.1052	0
V_{ij33}	3	3	3	3.5	3.5	0.3750	0.4375	0.1875	0
V_{ij34}	4	4	3	4	3.5	0.4737	0.4402	0.0861	0
V_{ij35}	2	2	1.5	2.5	3	0.2598	0.3150	0.3779	0.0473

表 5 计算结果

Tab. 5 Calculation results of

e	1	2	3	4
$X_{11e} = \sum_{k=1}^5 f_e(V_{11k})$	4.000	4.666	2.000	0.000

色评价系数 X_{11} 为 10.666。

由式(3)得, 所有专家就评价指标 V_{11} 对鄱阳湖区洪水灾害风险主张第 e 个评价灰类的灰色评价权向量 $r_{11} = (0.3748, 0.4375, 0.1875, 0)$ 。

同理可计算其他评价指标 V_{ij} 的灰色权向量。

依据式(4), 得到鄱阳湖流域洪水灾害风险的准则层 U_i

评价权矩阵 $R_i (i=1, 2, 3)$, 详细计算结果见表4。

由表(3)和式(5)得, 孕灾环境、致灾因子及承灾体的三个评价向量分别为

$$\begin{cases} B_1 = (0.3796, 0.3931, 0.2812, 0.0000) \\ B_2 = (0.3502, 0.4053, 0.2245, 0.0000) \\ B_3 = (0.4210, 0.4196, 0.1549, 0.0045) \end{cases}$$

由 B_1 得洪水灾害风险的总灰色评价权矩阵 $R = (B_1, B_2, B_3)^T$, 从而依据式(6)得到鄱阳湖流域洪水灾害风险的综合评价结果 $B = (0.3832, 0.4052, 0.2200, 0.0015)$ 。依据式(7)得综合评价值: $Y = B \times C^T = 3.1911$, 介于3和4之间偏向于3。

根据评分等级可知, 鄱阳湖流域的洪水灾害风险处于较低水平, 这与文献[7]利用层次分析法对鄱阳湖流域洪灾风险分析评估结论基本一致, 验证了该模型的可行性。另外, 文献[16]显示, 自2000年以来鄱阳湖流域没有遭遇大的洪灾, 甚至出现了连年的旱情, 也从侧面佐证了鄱阳湖流域洪灾风险近期处于较低水平, 与本文得出结果基本吻合。

4 结论

(1) 将层次分析法与灰色聚类法相结合, 可以取长补短; 在定量分析的基础上, 结合专业的经验知识, 可以使评价结果趋向合理化。

(2) 基于系统多层次灰色模型得到的评价结果与目前鄱阳湖流域洪水灾害风险现状基本一致, 证明了系统多层次灰色模型的可行性。

(3) 由于资料的缺乏和一些风险因素难以量化, 在评价洪水灾害风险时, 还需进一步完善评价指标体系, 因此洪水灾害风险综合评价模型应该是动态的, 需要在以后的研究中深入探讨。系统多层次灰色模型为实现洪水灾害综合评价提供了一条新途径, 同时该模型同样亦可推广于其他水利工程, 只需相应的调整评估内容和各单项指标即可。

参考文献(References):

- [1] 邹强, 周建中, 周超, 等. 基于可变模糊集理论的洪水灾害分析[J]. 农业工程学报, 2012, 45(7): 51-54. (ZOU Qiang, ZHOU Jianzhong, ZHOU Chao, et al. Flood disaster risk analysis based on variable fuzzy sets theory[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2012, 45(7): 51-54. (in Chinese))
- [2] 史培军. 再论灾害系统研究的理论与实践[J]. 自然灾害学报, 1996, 5(4): 6-11. (SHI Peijun. Theory and practice on disaster system research in a second time[J]. Journal of Natural Disasters, 1996, 5(4): 6-11. (in Chinese))
- [3] 陈香. 福建省农业水灾脆弱性评价及减灾对策[J]. 中国生态农业学报, 2008, 16(1): 206-211. (CHEN Xiang. Flood and water logging disasters in Fujian province and control strategies[J]. Chinese Journal of Eco Agriculture, 2008, 16(1): 206-211. (in Chinese))
- [4] 詹小国, 谭德宝. 基于3S技术的长江中下游洪涝灾情评估研究[J]. 人民长江, 2000, 31(12): 31-33. (ZHAN Xiaoguo, TAN Debao. Flood and waterlogging disaster evaluation in middle lower Yangtze by 3S technology[J]. Yangtze River, 2000, 31(12): 31-33. (in Chinese))
- [5] 殷洁, 裴志远, 陈曦武, 等. 基于GIS的武陵山区洪水灾害风险评估[J]. 农业工程学报, 2013, 29(24): 110-117. (YIN Jie, PEI Zhiyuan, CHEN Xiwei, et al. GIS-based flood disaster risk assessment in Wuling Mountain Region[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2013, 29(24): 110-117. (in Chinese))
- [6] 蒋卫国, 李京, 李忠武, 等. 洪水灾害人口风险模糊评价[J]. 湖南大学学报: 自然科学版, 2008, 35(9): 84-87. (JIANG Weigu, LI Jing, LI Zhongwu, et al. Fuzzy assessment of the population risk of flood disaster[J]. Journal of Henan University: Natural Sciences, 2008, 35(9): 84-87. (in Chinese))
- [7] 胡久伟. 鄱阳湖区洪灾风险分析与评估[D]. 江西: 江西师范大学, 2011. (HU Jiurui. Risk analysis and assessment of flood disaster in Poyang Lake region[D]. Jiangxi: Jiangxi Normal University. (in Chinese))
- [8] 史培军. 三论灾害研究的理论与实践[J]. 自然灾害学报, 2002, 11(3): 1-9. (SHI Peijun. Theory and practice on disaster system research in a third time[J]. Journal of Natural Disasters, 2002, 11(3): 1-9. (in Chinese))
- [9] 扈海波, 张艳丽. 暴雨灾害人员伤亡风险快速预评估模型[J]. 灾害学, 2014, 29(1): 30-36. (HU Haibo, ZHANG Yanyan. Quick assessing model on casualty loss in rainstorms[J]. Journal of Catastrophology, 2014, 29(1): 30-36. (in Chinese))
- [10] 汪红洲, 段衍衍, 傅春. 基于层次分析的安徽省水安全综合评价[J]. 南水北调与水利科技, 2013, 12(1): 38-42. (WANG Hongzhou, DUAN Yanyan, FU Chun. Water security evaluation of Anhui Province based on analytic hierarchy process[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2013, 12(1): 38-42. (in Chinese))
- [11] 王永刚, 胡开元. 一种基于改进灰色聚类分析的综合评价方法[J]. 中国民航大学学报, 2010, 28(1): 48-51. (WANG Yonggang, HU Kaiyuan. Comprehensive evaluation method based on improved gray clustering analysis[J]. Journal of Civil Aviation University of China, 2010, 28(1): 48-51. (in Chinese))
- [12] 姬宏, 田盛. 基于灰色关联度的干旱区社会经济子系统需水量协调研究[J]. 南水北调与水利科技, 2009, 7(3): 42-44. (JI Hong, TIAN Sheng. Coordination study on water demand of socioeconomic subsystem in arid area based on grey relational grade[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2009, 7(3): 42-44. (in Chinese))
- [13] 王丽珍, 黄跃飞, 王光谦. 基于不确定性的区域水资源可持续性评价[J]. 水力发电学报, 2013, 32(6): 83-90. (WANG Lizhen, HUANG Yuefei, WANG Guangqian. Sustainability assessment on regional water resource system under uncertainties[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2013, 32(6): 83-90. (in Chinese))
- [14] 李林涛, 徐宗学, 庞博. 中国洪灾风险区划研究[J]. 水利学报, 2012, 43(1): 22-30. (LI Lintao, XU Zongxue, PANG Bo, et al. Flood risk zoning in China[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2012, 43(1): 22-30. (in Chinese))
- [15] CHEN B, YANG T, QI J D. Fault forecast technology of machine based on grey theory for aero engine product line[J]. Advanced Materials Research, 2011, 338: 718-722.
- [16] 姜鲁光. 退田还湖后鄱阳湖洪水风险与土地利用新变化[J]. 人民长江, 2009, 40(17): 8-10. (JIANG Ruguang. After Returning Poyang new flood risk and land use change[J]. Yangtze River, 2009, 40(17): 8-10. (in Chinese))