

陈佳超, 吴凡, 花铁森, 等. 基于层次分析法的中国各省市安全评估[J]. 灾害学, 2014, 29(4): 198-203. [Chen Jiachao, Wu Fan, Hua Tiesen, et al. Evaluation of Chinese Provinces' Safety by the Analytic Hierarchy Process [J]. Journal of Catastrophology, 2014, 29(4): 198-203.]

基于层次分析法的中国各省市安全评估^{*}

陈佳超¹, 吴凡¹, 花铁森², 王松盛³, 陆培德⁴

(1. 上海交通大学 船建学院土木工程系, 上海 200240; 2. 上海花懋工程技术咨询有限公司, 上海 200092;
3. 上海华钟咨询服务有限公司, 上海 200020; 4. 中国科学院上海技术物理研究所, 上海 200081)

摘要:近年来, 西方发达国家愈发重视对城市安全评价研究, 并且扩展至对“国家安全度”的评价研究。在国内, 许多学者也逐渐对“安全城市”评价指标体系进行研究。然而, 对于在我国的省或直辖市一级, 即相当欧美的州一级地区的安全评价指标体系却鲜有研究人员涉猎。该文基于层次分析法对中国各省市的安全评估进行研究, 以定性和定量相结合、系统化、层次化的分析方法, 结合软件开发, 实用有效地处理这类的复杂问题。通过层次分析法并运用有关的统计数据和专家评分, 初步获得了中国各省市安全评估的基本情况, 得出由于西部地区天气干燥、现代化发展进程较慢, 导致在火灾与交通风险相对较大。由于统计数据有限, 我们的统计评估是基于生产、交通及火灾事故数据。

关键词:层次分析法; 中国; 各省市; 安全评估, 软件开发

中图分类号: X43 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-811X(2014)04-0198-06

doi: 10.3969/j.issn.1000-811X.2014.04.036

目前, 国际上把能够带来安全问题的灾害按组成灾害系统的致灾因子归于三类, 即自然原因、人为原因、环境原因。在联合国开展十年减灾活动和美国911事件之后, 人们更为广泛地认识到安全领域的重要性, 并积极地将视野投向这些新的领域, 特别是严峻的人口与社会、环境的风险问题。基于监测、描述和解释国际社会公共安全的需要, 在研究和实践中设计了一系列公共安全评估框架, 它们有力地促进了人类安全和国际社会的共同发展^[1]。

在国内, 城市化过程中, 人们对资源浪费、环境污染这两大问题认识得较早, 宣传也较多。但在城市公共安全的防范和应急管理方面则相对薄弱。如今, 城乡公共安全的预防与应急系统建设已逐渐得到重视。不管是理论研究、法制建设、管理体系建设或规划应用层面都在加强, 并取得了一些成绩。但也应该清醒地认识到, 对于城乡公共安全建设, 还有许多亟待加强的方面, 如缺乏综合协调, 灾害种类考虑不足, 管理体系不健全等。

本文的研究将在分析我国城市安全发展必要

性及紧迫性的基础上, 借鉴外国管理体系与实践经验, 从现有的城市安全管理模式入手, 进行可行性研究, 探寻完善我国城市管理的途径与方法, 以期能够为我国城市安全管理实践提供指导。

现有的分析方法有: 模糊层次分析法^[2], 一种结合层次分析法以及模糊综合评价法的分析应用; 主成分分析法^[3], 旨在利用降维的思想, 把多指标转化为少数几个综合指标; “层级叠加”原理^[4], 一种将单独评价拓展为相关耦合评价; 可变模糊聚类, 以动态变化的相对隶属度概念为基础的工程模糊集理论; Case-based reasoning 思想方法^[5], 一种基于经验知识进行推理的求解方法。

在选择公共安全评价方法时, 我们的研究原则是力求简单适用, 可操作性强, 减少评价的主观性, 增加客观性。因此, 我们选择层次分析法, 它以原始数据为基础, 能克服因素权重由专家打分的弊端, 得到的评价结果能够客观反映省(自治区、直辖市)的安全现状^[6-7]。

层次分析法是一种将定性分析与定量分析相结合的多目标决策分析方法。运用层次分析法对一个复杂系统分析时, 首要任务是将该问题进行

^{*} 收稿日期: 2014-04-28 修回日期: 2014-06-20

基金项目: 国家自然科学基金面上基金(NSFC-51278300); 国家自然科学基金重点基金(NSFC-61227017)

作者简介: 陈佳超(1992-), 男, 浙江镇海人, 大学本科生, 主要从事灾害风险评估与管理、风险评估软件开发的研究。

E-mail: chenjc369@gmail.com.cn

通讯作者: 吴凡(1963-), 女, 上海人, 博士, 副教授, 主要从事建筑结构灾害风险评估与管理、结构健康监测的研究。

E-mail: fanwu@sjtu.edu.cn

层次化。

根据问题的性质和该问题所需达到的总目标,将复杂问题分解为若干因素,并按照各个因素之间的相互关联和相互制约的从属关系,将众多因素按不同层次聚集组合,构成多层次的分析结构模型。然后进行排序计算,引入1~9比率标度方法,构成判断矩阵,通过计算判断矩阵的最大特征根及其对应的特征向量,再经过层次单排序和层次总排序以及一致性检验,就能依次得到各个因素对于最高目标层的相对重要性权值。决策者可根据这些数量分析,选定最佳的决策方案^[8]。

1 层次分析法简介

层次分析法的主要过程包括以下几个方面:建立层次结构模型;专家评分,构造判断矩阵;层次单排序;层次单排序的一致性检验;层次总排序;层次总排序的一致性检验;最后得到总排序权值。

1.1 建立层次结构模型,构造判断矩阵

对整个复杂问题进行深入分析之后,明确问题的范围与该问题相关联的各个因素,确定这些因素之间的隶属关系和制约关系。基于此,将问题所包含的因素根据是否共同拥有某些特性将它们聚集成组,将这种共有的特性作为系统新层次中的某个因素;进一步的,这些新层次中的因素也能够按照另外一种共有特性整合成新的组,形成更高一层次的因素;以此逐层进行整合,直到最终形成单一的最高因素,即决策的目标。即整个复杂的问题就被明确地划分为多个不同层次。而层次间的递阶结构与各个因素的从属关系,可以通过框图形式更清楚地显示,可参见图1。若某一个层次所包含的因素大于9个时,可考虑将该层次进一步划分为若干子层次,以提高标度专家判断的准确性^[9]。

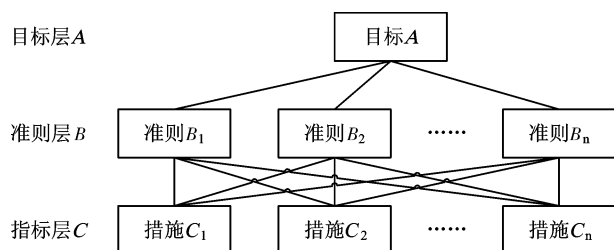


图1 层次分析法的常用模型结构

在建立了结构层次模型后,由多名专家各自对目标层下的所有因素逐层评价,采用1~9来表示各层因素之间的重要性等级。综合多名专家评分的标度情况得到因素间较为准确的重要性。判断矩阵元素的值是由同层次内各个因素间的比

值所确定的,反映了各因素相互之间的相对重要性的。在构造时,当相互比较因素的重要性能够用具有实际意义的比值说明时,判断矩阵相应元素的值则可以取这个比值^[10]。

1.2 层次单排序及其一致性检验

对已知判断矩阵 A ,可以通过式(1)^[11]解出判断矩阵 A 的特征根和特征向量 W ,经归一化后即为同一层次相应各因素对于上一层次某因素的重要性的排序权值(即权重向量),这一过程称为层次单排序。

$$AW = \lambda_{\max} W \quad (1)$$

根据矩阵理论,当判断矩阵不能保证具有完全一致性时,相应判断矩阵的特征根也将发生变化,这样就可以用判断矩阵特征根的变化来检查判断矩阵的一致性程度。因此,在层次分析法中引入判断矩阵最大特征根以外的其余特征根的负平均值,作为度量判断矩阵偏离一致性的指标,即通过式(2)^[11]进行层次单排序(或判断矩阵)的一致性检验。

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} \quad (2)$$

为了度量不同判断矩阵是否具有满意的一致性,引入判断矩阵的随即一致性指标 RI 值^[11]。

通过式(3)^[11]检验判断矩阵具有满意的一致性,可用其特征向量作为权向量。否则要重新调整判断矩阵,使之具有满意的一致性。

$$CR = \frac{CI}{RI} < 0.10 \quad (3)$$

1.3 层次总排序及其一致性检验

计算同一层次所有因素对于最高层(总目标)相对重要性的排序权值,称为层次总排序。这一过程是最高层次到底底层次逐层进行的,若上一层次 A 包含 m 个因素: A_1, A_2, \dots, A_m ,其层次总排序权值分别为 a_1, a_2, \dots, a_m ,下层次 B 包含 n 个因素 B_1, B_2, \dots, B_n ,他们对于因素 A_j 的层次单排序权值分别为 $b_{1j}, b_{2j}, \dots, b_{nj}$ (当 B_k 与 A_j 无联系时, $b_{kj} = 0$)。由式(4)^[11]可知 B 层次总排序权值。

$$B_i = \sum_{j=1}^m a_j b_{ij} \quad (4)$$

式中: $i = 1, 2, 3, \dots, n$ 。

这一步骤也是从高到低逐层进行的。如果 B 层次某些元素对于 A_j 单排序的一致性指标为 CI_j ,相应的平均随机一致性指标为 CR_j ,则 B 层次总排序随机一致性比率可通过式(5)^[11]得到。

$$RI = \frac{\sum_{j=1}^m a_j CI_j}{a_j CR_j} \quad (5)$$

类似地,当 $RI < 0.10$ 时,认为层次总排序结果具有满意的一致性,否则需要重新调整判断矩阵的

元素取值。

2 基于 Matlab 编译程序的层次分析法软件开发

层次分析法具有将定量与定性分析相结合的优点,是一种将思维过程数学化的方法。不仅在一定程度上简化了系统分析,还有助于决策者保持其思维过程的一致性。在一般的决策问题中,决策者不可能给出精确的比较判断,这种判断的不一致性可以由判断矩阵的特征根的变化反映出来。并且,通过一致性检验,可以检查和保持决策者判断思维过程的一致性。进一步确保它能为最佳方案的选择提供科学依据,为决策层做出正确的决策提供理论参考。

然而,层次分析法的运用在一些复杂的、层次较多的系统中,计算量较大。尤其是要进行一致性检验时,如果判断矩阵的阶数较大,必定带来庞大的计算量,使计算非常困难。因此,我们开发了相关软件程序,用编程程序代替笔算,大大提高决策的效率。

为便于各个层次数据的输入以及最终结果的获取,本程序都将以 Excel 的形式输入与输出。因此运行本程序之前,首先需要将 Matlab 软件与 Excel 软件相关联。在输入过程中需注意输入页面的提示。

本程序拥有基于 GUI 的简洁界面窗口,填入相应的输入与输出路径,点击“运行”按钮,开始主程序。

进入主程序后,首先确认是否在程序计算过程中同时在 Matlab 窗口显示运算过程并保留,该项可以通过 Excel 输入时进行调整。接着通过数据处理的子程序从 Excel 表格中获取数据并进行排序计算。

本程序的总流程图可参考图 2。

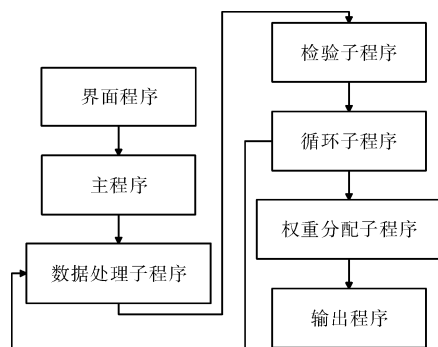


图2 程序总流程图

针对结构模型相邻的两个层次,在单排序计算和总排序计算分别具有各自的共性。对指标层与要素层进行分析时,先通过式(1)、式(2)和式

(3)对指标层(即较低层)进行单排序并检验一致性,再通过式(4)和式(5)结合要素层(即较高层)对指标层(即较低层)进行总排序并检验一致性。相似的,在对要素层与准则层进行分析时,要素层成为了较低层,准则层成为了较高层。基于这一相似点,本程序以数据处理的子程序和检验子程序为计算基础,通过循环子程序控制循环操作,先研究最低的两层然后一层一层向上研究。

由于排序计算通常是自下而上的计算过程,然而最终的权重分配却是自上而下的计算过程。所以,在进行以上程序运算的同时,每一层的特征向量(即权重向量)都会被记录,直到最后完成所有层次的排序,将结合各层特征向量情况通过式(4)进行总的权重分配。最终在指定路径中的 Excel 内输出整个复杂系统的权重分配情况。

3 基于层次分析法的中国各省市安全评估

本节意在将层次分析法实际运用在中国各省市安全评估案例中。正如上节所介绍的,分析的第一步就是建立层次结构模型由专家进行评分。在我国各省市安全评估中,指标体系评价方法采用加权综合评分法,即各指标均以三级计分法测评,再确定各指标在体系中的权重,最后将各指标按权重所得评分加总,得出总分^[12]。

3.1 确定三级指标权重评分,建立层次结构模型

基于“安全第一,以人为本”理念,3个层次三级指标选取的基本原则,均以以人为本的价值体系,物质损失其次的价值观。根据各项指标在评价指标体系中的重要性,确定各级指标如表1所示^[13-14]。

对于以上两层指标选定后,由专家细分第三层指标的选取情况,并根据专家对城市风险的各个因素进行重要性评分,构造安全因子层次结构模型。

以生存环境这一项指标为例。它由自然环境与工业化环境两大要素组成。

在构成自然环境各要素中,包括空气、废水、废物、绿化、生态和土壤,其中生态作为可持续性环境工程中的重要组成部分,其权重分值较高,其他五要素权重同等。

在工业化环境(城镇)中,(供)水、电、气(燃气和北方取暖热气)与排水均为居民必需品,故权重分值同等;然而(公共设施 and 住宅)电梯投入运行量与日俱增,与前者四要素不同,一旦停用带来诸多不便,而后者将是一个潜在的风险源,出现故障会造成人员伤亡,故权重分值较高。上述属建筑内设施,而公共环境(城镇)中,楼、路和桥因各种因素造成倒塌和塌陷事故迭起,防不胜

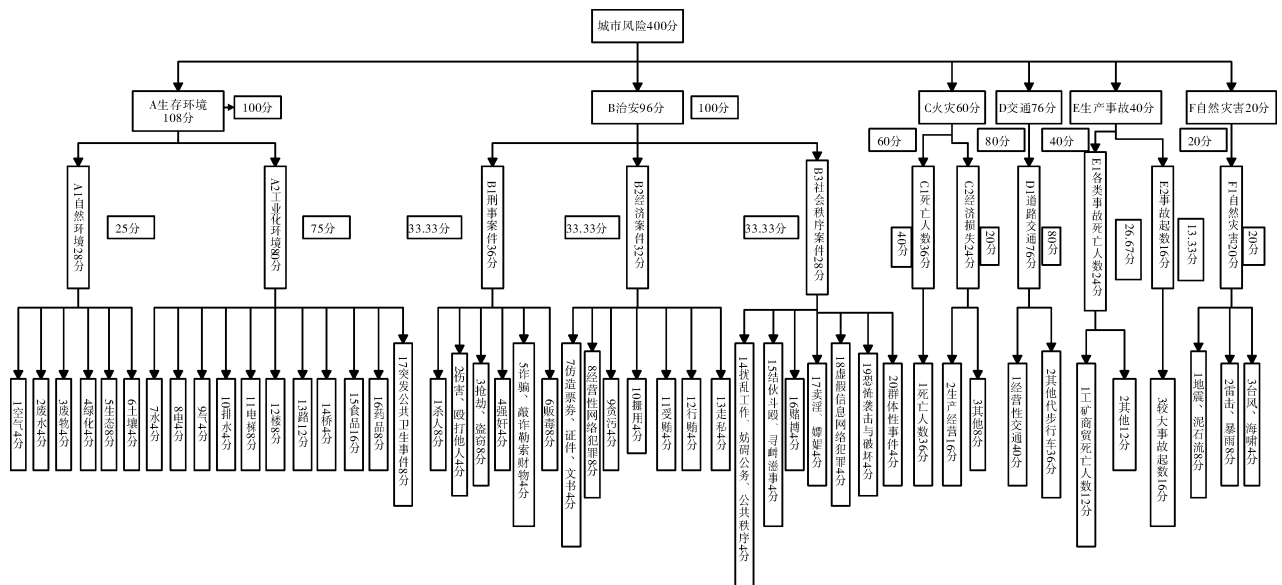


图3 城市风险结构模型

防,政府作为社会管理机构负有不可推诿责任,故权重分值较高于上述属建筑内设施要素。

类似地,依次讨论研究其余的一级指标,得到层次结构模型如图3所示。

表1 城市安全一、二级指标

一级指标	二级指标	遴选说明
生存环境	自然环境	囊括城镇和乡村的原生态环境。
	工业化环境	城镇工业化环境变迁,衍生诸多问题。
治安	刑事案件	刑事案件对人们生命安全潜在危险。
	经济案件	经济案件使人们财产损失,社会关注度大。
	社会秩序案件	社会秩序案件与日俱增,对社会稳定破坏力大。
火灾	死亡人数	大小事故频发,生命损伤较大。
	经济损失	物质损失巨大,全社会关注度高。
交通	道路交通事故	其事故频发,生命损伤巨大,全社会关注度高。
	工业危险源	事故频发,生命损伤大,社会关注度大。
生产事故	特种设备	特殊事故事件,引起社会关注度大。
	自然灾害	地质性灾害、气候性灾害和复合性自然灾害属不可抗力,全社会关注。

根据指标层、要素层、准则层、目标层构造判断矩阵,通过编写的 Matlab 程序依次进行层次单排序及其一致行检验,以及层次总排序及其一致行检验。即通过层次分析法,结合要素层与指标层总排序权值,对专家评分权重由上而下重新分配,经过一致性检验,消除了人为因素的偏差,得到图4、图5、图6各个加权分图。

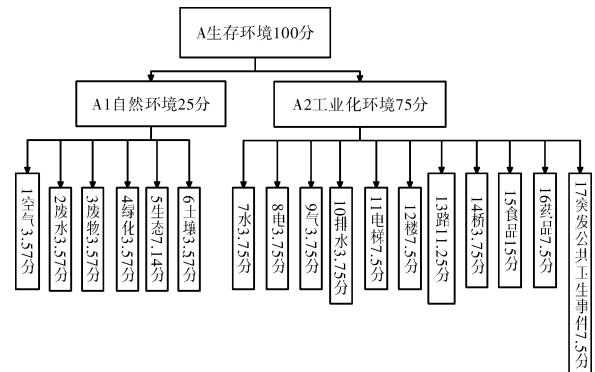


图4 加权后生存环境层次分图

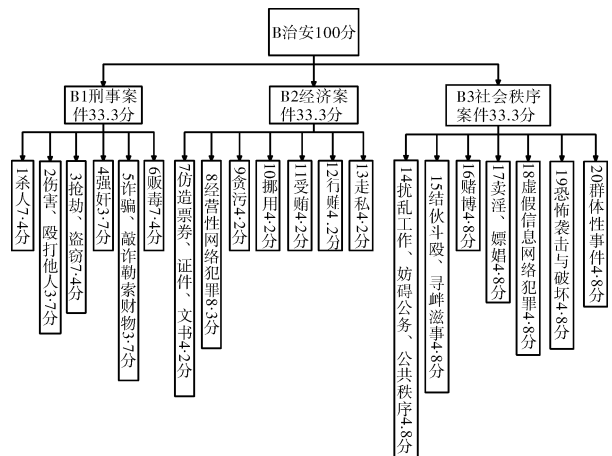


图5 加权后治安层次分图

3.2 建立省(直辖市)安全排名表

根据2012年全国各省(直辖市)的交通及火灾的统计数据,结合以上由层次分析法得到的权重,得出下列的基于交通与火灾数据的省市安全风险排名表(表2),以权重分值最大为最不安全。

最终,通过层次分析法,我们可以获得中国各省市安全评估情况,由排名可见,西部地区由

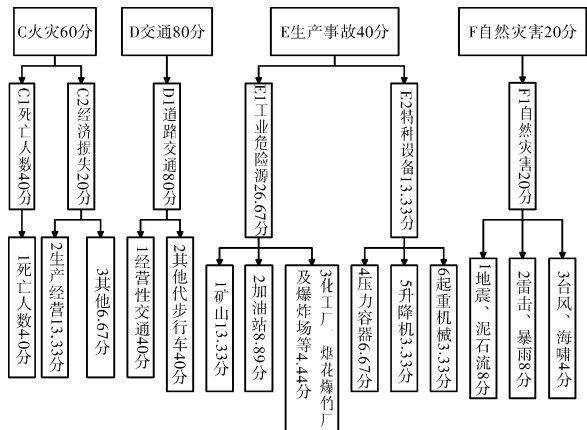


图6 加权后火灾、交通、生产事故和自然灾害层次分图

表2 基于交通与火灾数据的省市安全风险排名表

排名	省(自治区、直辖市)	得分(400为总分)
1	青海	112.157 689 1
2	西藏	60.661 673 05
3	新疆	52.354 848 68
4	甘肃	45.052 170 72
5	浙江	42.734 318 4
6	福建	37.224 068 13
7	贵州	35.623 487 99
8	陕西	35.518 534 94
9	山西	34.103 388 53
10	辽宁	33.894 625 69
11	海南	33.139 255 25
12	云南	32.622 172 11
13	广东	30.985 451 03
14	广西	29.982 268
15	内蒙古	29.932 988 47
16	江苏	29.570 584 85
17	宁夏	29.115 889 73
18	天津	28.796 286 58
19	上海	28.282 797 05
20	吉林	28.206 361 61
21	江西	28.020 915 33
22	安徽	26.941 973 5
23	北京	25.096 632 93
24	四川	23.841 885 25
25	重庆	22.809 455 4
26	湖南	20.213 424 18
27	山东	19.998 879 62
28	湖北	19.986 683 94
29	河北	19.953 660 38
30	黑龙江	19.774 177 73
31	河南	9.791 596 365

于天气干燥、现代化发展进程较慢，导致在火灾与交通风险相对较大。西部共有6个省(直辖市)风险得分排在全国前10位，其中西北地区有4个省(直辖市)，西南地区有2个省(直辖市)；西部

共有4个省(直辖市)排在全国前5位，其中西北有3个省(直辖市)排在全国前5位，西南地区有1个省(直辖市)。

4 结论

基于层次分析法，我们获得了中国各省市安全评估情况，我们发现，西部共有6个省(直辖市)风险得分排在全国前十位。我们认为西部地区由于天气干燥、现代化发展进程较慢，是导致在火灾与交通风险相对较大的主要原因。

通过本次对中国各省市进行安全评估后，有效解决了在城乡公共安全评估时遇到的复杂问题，如缺乏综合协调，灾害种类考虑不足，管理体系不健全等。本研究借鉴了外国管理体系与实践经验，从现有的城乡安全管理模式入手，完善了我国城乡管理的路径与方法，综合城乡管理各方面的因素，为我国城乡安全管理实践提供指导。此外，在我们的研究过程中，我们开发了层次分析法的软件应用，由此能有效地进行大量庞杂的计算过程，弥补了层次分析法原有的计算复杂的困难。

在选择层次分析法作为公共安全评价方法时，其可操作性强，简单实用，在拥有足够原始统计数据的情况下，能减少评价的主观性，增加客观性，并且克服因素权重由专家打分的弊端。因此这种评价方法更适合省(直辖市)安全评价，评价结果能够客观反映出省(直辖市)的安全现状。

然而，在研究进行过程中，我们发现，在原有的结构模型下，仍然有许多原始数据未能从相关政府部门获得，因此，我们仅能通过已公开的统计数据对各省市安全进行评估。由于数据的缺乏，导致了本次结果的局限性。今后，我们认为，增加评分专家的数量能减少个人主观性的误差，从而得到更准确的因素权重；有关政府职能部门对于各类原始数据统计的准确性、公开性、时效性，也将是进一步完善城市安全评估体系的另一个重要思路。

参考文献：

[1] 熊炜, 李琳, 张帝, 等. 关于建立健全城市公共安全评价体系的探讨[J]. 中国公共安全: 学术版, 2011, 25(4): 5-8.

[2] 徐丰良. 城市安全评价体系构建的研究[D]. 长沙: 湖南科技大学, 2011.

[3] 姜喆. 城市道路交通安全的交通条件分析研究[D]. 西安: 长安大学, 2008.

[4] 翁韬, 朱霁平, 麻名更, 等. 城市重大危险源区域风险评价研究[J]. 中国工程科学, 2006, 8(9): 80-84, 89.

[5] 张明媛, 刘妍, 袁永博. 城市自然灾害综合风险评估问题研

- 究[J]. 防灾减灾工程学报, 2012, 32(2): 176–180.
- [6] 郭金玉, 张忠彬, 孙庆云. 层次分析法的研究与应用[J]. 中国安全科学学报, 2008, 18(5): 148–153.
- [7] 吴殿廷, 李东方. 层次分析法的不足及其改进的途径[J]. 北京师范大学学报: 自然科学版, 2004, 40(2): 264–268.
- [8] 赵焕臣, 许树柏, 和金生. 层次分析法——一种简易的新决策方法[M]. 北京: 北京科学出版社, 1986.
- [9] Saaty T L, Tran L T. On the invalidity of fuzzifying numerical judgments in the Analytic Hierarchy Process[J]. Mathematical and Computer Modeling, 2007, 46(7): 962–975.
- [10] Saaty T L, Shang J S. Group decision-making: Head-count versus intensity of preference[J]. Socio-Economic Planning Sciences, 2007, 41(1): 22–37.
- [11] Saaty T L. The Analytic Hierarchy Process, [M] McGraw Hill, Inc., 1980.
- [12] 赵运林. 城市安全指数(ICS)模型、结构与功能分析[J]. 湖南城市学院学报: 自然科学版, 2006, 15(4): 1–4.
- [13] 高萍, 高怡, 李海君, 等. 我国基于应急管理的突发自然灾害区域划分[J]. 灾害学, 2013, 28(3): 138–141, 165.
- [14] 廖永丰, 赵飞, 王志强, 等. 2000–2011 年中国自然灾害灾情空间分布格局分析[J]. 灾害学, 2013, 28(4): 55–60.

Safety Evaluation on Provinces and Cities in China by Analytic Hierarchy Process

Chen Jiachao¹, Wu Fan¹, Hua Tiesen², Wang Songshen³ and Lu Peide⁴

(1. Department of Civil Engineering, School of Naval Architecture, Ocean and Civil Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China; 2. Shanghai Huamao Engineering and Technology Consulting Company, Shanghai 200092, China; 3. Shanghai Huazhong Consulting Corporation, Shanghai 200020, China; 4. Shanghai Institute of Technical Physics of the Chinese Academy of Science, Shanghai 200081, China)

Abstract: In recent years, the western developed countries pay more attentions on urban safety evaluation studies. They further extend the studies into the field of national safety. In China, many scholars gradually focus on the research of safe city index evaluation system. However, few researchers do the similar studies on the level of provinces or megacities which is equivalent to the state in Europe and America. Our study proposes a method based on AHP (Analytic Hierarchy Process) to evaluate the safety of China province and megacity. By using AHP and software developed, this kind of complex problems can be handled practicably and effectively by using a combination of qualitative and quantitative analysis method. Through the use of AHP with the relevant statistical data and expert ratings, the basic results of Chinese provinces' safety evaluation are preliminarily achieved. We get the conclusion that the dry weather and the poor modernization in the western region result in a high risk of fire and traffic. Because of the limited statistical data, the evaluation result is based on the data in fields of production, traffic and fire.

Key words: Analytic Hierarchy Process; China; provinces and cities; safety evaluation; software development