

长三角地区省级雾霾影响综合风险评价

姜绵峰 叶春明  
(上海理工大学管理学院,上海,200093)

**摘 要** 为全面评估雾霾天气对经济社会生态的安全状况,基于自然灾害系统理论构造了雾霾危害综合风险评估体系并结合层次分析法和熵权法计算了各子因素权重,采用物元可拓模型计算长三角三省市雾霾危害综合风险的关联系数、判定等级.计算结果表明:上海市综合风险等级判定为严重,江苏省综合风险等级处于轻度,浙江省综合风险等级处于微度,同时使用综合指数法的计算结果验证了结果可信.最后根据三省市各项风险因素的权重大小、风险等级和改变难度综合评价各项风险因素,确定了长三角各省市降低雾霾危害风险水平的关键因素.

**关键词** 雾霾 综合风险评估 物元可拓模型 关联系数

Comprehensive Risk Evaluation of Haze for Economic and Social Development in Yangtze River Delta District

Jiang Mianfeng Ye Chunming  
(Business School, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200090, China)

**Abstract** The aim of the paper is to make a comprehensive risk evaluation of potential hazard from Haze weather. We constructed the evaluation system of indicating factors which consists of 21 indicators in 3 categories on the basis of disaster systemic theory. We combined the Analytical Hierarchy Process (AHP) and the entropy approach to determine these indicators' weight. With the indicator system and its weights in hand, we calculate the correlation coefficient of comprehensive risk of haze pollution of three provinces in in Yangtze River delta district. The results indicated that the security risk level of Shanghai Jiangsu and Zhejiang is IV, II and I respectively. The evaluation result based on matter—element extension model was accord with the result of traditional comprehensive index evaluation method, which proved that this model was reliable. In addition, we classified evaluation index in terms of weight, security level and improve difficulty, and find key index to reduce the risk level quickly.

**Key words** Haze Comprehensive risk assessment Matter—element extension model Relation coefficient

国家自然科学基金项目(71271138),上海市哲学社会科学规划项目(2014BGL024),上海市一流学科资助项目(S1201YLYK)和沪江基金资助项目(A14006)资助  
收稿日期:2016 年 05 月 20 日

# 1 引言

近年来我国京津冀、长三角等地区持续性雾霾天气频发,对城市居民生活和城市经济发展造成了许多不良影响, $PM_{10}$ 、 $PM_{2.5}$ 等专业词汇引起了广泛关注.目前对于雾霾的形成机理和演化规律的认识刚刚起步,雾霾的影响却在不断积累分秒未停,其潜在的环境风险是重要的研究课题.

针对我国雾霾重污染现象,国内学者从不同范围和途径进行了深入研究.施晓晖等学者<sup>[1]</sup>研究了北京地区气溶胶与大雾天气的关系以及气溶胶颗粒物的影响成分.王杨君等学者<sup>[2]</sup>分析了上海雾霾颗粒物中碳元素含量和结构在不同情况下的变化规律.包贞等<sup>[3]</sup>基于环境受体样本信息剖析了雾霾颗粒物的主要来源比例.吴兑等<sup>[4]</sup>学者综合气象、遥感和化学领域分析了重霾期间的气溶胶各成分含量以及与气象要素的关系.程念亮等<sup>[5]</sup>认为全国大部分地区冬季雾霾严重,且机动车尾气贡献率不断增加.童玉芬等<sup>[6]</sup>系统地阐述了城市人口发展同雾霾形成的相互作用过程.国外雾霾污染研究主要表现为空气污染对经济社会中敏感性特征、疾病死亡率和农业产量等的影响分析. Anna 等, Jun 等分别研究了婴儿<sup>[7]</sup>、孕妇<sup>[8]</sup>等脆弱人群的污染敏感性. Cécile 等<sup>[9]</sup>和 William 等<sup>[10]</sup>学者评估了室内空气污染对人群的潜在风险. B. R. Gurjar 等<sup>[11]</sup>探讨了交通尾气对人群疾病致死率的影响. Liu 等<sup>[12]</sup>分析了雾霾对在不同季节、体质下对健康寿命的影响. Jo Kay 等<sup>[13]</sup>研究了汽车尾气对婴儿出生状况的风险影响. Sun 等<sup>[14]</sup>分析了雾霾颗粒中各类重金属对细胞质粒 DNA 的氧化破坏作用. Shuai 等<sup>[15]</sup>研究认为雾霾发生对大米产量有负面影响. 上述研究表明雾霾污染能引起大量心脑血管类疾病,减少人体寿命,还会影响农业粮食产量,存在极大的环境生态风险.

当前对雾霾的研究集中在气象领域和环境科学领域探索雾霾现象的污染来源和演变过程,而对于雾霾污染引发的经济风险、社会风险和生态风险得研究十分缺少. 文章将建立雾霾危害的评估体系,采用物元可拓模型分析长三角雾霾的经济社会生态整体风险状况,对长三角地区雾霾危害预防工作提供科学依据.

# 2 模型原理与计算

物元可拓模型源自蔡文研究员建立的可拓理论<sup>[16]</sup>. 模型的基本思想是:参考过去的资料数据和经验,先划定待评估对象的类别,并根据相关研究成果划定不同类别的边界领域,然后

代入研究对象的各属性参数计算研究对象相对各分类的关联系数,依据关联系数大小来判断研究对象属性的所属类别,应用前景广阔.具体过程计算包括:

### 2.1 雾霾危害综合风险物元

雾霾污染综合风险  $N$ (以下简称综合风险),综合风险特征  $A$  和特征值  $V$ ,共同组成综合风险物元,记做  $R=(N,A,V)$ ,若  $N$  有  $n$  个特征  $A_1,A_2,A_3\cdots A_n$ ,则表示为:

$$R = \begin{vmatrix} N & A_1 & V_1 \\ & A_2 & V_2 \\ & \vdots & \vdots \\ & A_n & V_n \end{vmatrix}$$

### 2.2 确定风险等级领域边界

综合风险的经典域集合  $R_N$  定义如下:

$$R_N = (N_j, A_n, V_n) = \begin{vmatrix} N_j & A_1 & (a_{j1}, b_{j1}) \\ & A_2 & (a_{j2}, b_{j2}) \\ & \vdots & \vdots \\ & A_n & (a_{jn}, b_{jn}) \end{vmatrix} \quad (1)$$

式中,  $N_j$  为划分的  $j$  个风险等级;  $A_1, A_2, A_3, \cdots A_n$  为评估指标;  $(a_{jn}, b_{jn})$  代表评价属性  $A_n$  处于第  $j$  个风险等级区间范围.

雾霾风险节域集合  $R_p$  定义如下:

$$R_p = (N_p, A_n, V_p) = \begin{vmatrix} N_p & A_1 & (a_{p1}, b_{p1}) \\ & A_2 & (a_{p2}, b_{p2}) \\ & \vdots & \vdots \\ & A_n & (a_{pn}, b_{pn}) \end{vmatrix} \quad (2)$$

其中,  $N_p$  表示由雾霾不同类别风险组成的总体;  $A_1, A_2, A_3, \cdots A_n$  为各子风险属性;  $(a_{pn}, b_{pn})$  表示节域物元与属性  $A_n$  匹配的值域集合.

### 2.3 计算风险等级关联系数

综合风险关联函数为:

$$K_j(V_{it}) = \begin{cases} \frac{-\rho(v_{it}, V_{ij})}{|V_{ij}|}, v_{it} \in V_{ij} \\ \frac{\rho(v_{it}, V_{ij})}{\rho(V_{it}, V_{pn}) - \rho(V_{it}, V_{ij})}, v_{it} \notin V_{ij} \end{cases} \quad (3)$$

式中,  $F_j(V_{it})$  代表评估对象  $t$  的属性  $i$  对应于综合风险类别  $j$  的关联系数.

$$V_{ij} = |b_{jn} - a_{jn}| \quad (4)$$

$$\rho(v_{ijt}, V_{ij}) = \left| v_{ijt} - \frac{1}{2}(a_{in} + b_{in}) \right| - \frac{1}{2}(b_{in} - a_{in})$$

$$(i = 1, 2, 3, \dots, n; j = 1, 2, 3, \dots, s; t = 1, 2, \dots, m) \quad (5)$$

$$\rho(v_{ijt}, V_{pn}) = \left| v_{ijt} - \frac{1}{2}(a_{pn} + b_{pn}) \right| - \frac{1}{2}(b_{pn} - a_{pn}) \quad (i = 1, 2, 3, \dots, n; t = 1, 2, \dots, m) \quad (6)$$

式中,  $V_{ij}, V_{pn}$  各代表综合风险物元的经典域和节域区间范围;  $\rho(v_{it}, V_{ij})$  表示评价属性值  $V_{it}$  与相应等级集合  $V_{ij}$  的间距;  $\rho(v_{it}, V_{pn})$  表示评价属性值  $V_{it}$  与相应等级区间  $V_{pn}$  的间距.

## 2.4 计算综合风险等级

综合关联系数表示研究对象总体属性值与风险类别  $i$  的隶属度, 定义如下:

$$F_j(p_t) = \sum_{i=1}^n \omega_i f_j(v_{it}), \quad (7)$$

其中,  $F_j(p_t)$  为研究对象  $t$  对应风险等级  $j$  的关联系数;  $\omega_i$  为个评估指标的权重;  $f_j(v_{it})$  为评估属性  $i$  对应等级  $j$  的关联系数. 若  $F_j(p_t) = \max\{F_j(p_t)\}$ , 则研究对象  $t$  属性  $i$  属于综合风险评估  $j$  等级. 关联系数  $F_j(p_t)$  的数值代表了研究对象属于某风险等级类别的符合程度, 当  $F_j(p_t) > 0$ , 则研究对象属性符合第  $i$  等级区间要求, 数值大小表明了从属该区间范围的程度; 当  $-1 < F_j(p_t) < 0$ , 则评估指标不匹配风险等级  $j$ , 而具有符合该等级区间的潜力, 数值大小代表可能性的大小; 当  $F_j(p_t) < -1$ , 则评估属性不匹配第  $j$  等级区间的范围, 而且没有可能符合该风险等级.

## 2.5 评估指标的权重

在风险评估体系中, 各类指标的数据信息量大且分散存在, 在计算处理时需要通过各自权重组成综合评估结果, 因此权重的多少对结果的影响很大. 主流权重计算方法包括专家打分法、AHP 模型、熵权法等. AHP 模型主要是通过两两属性比较构造本征向量来计算特征值及特征向量, 一致性检验后就得到各属性的权重; 熵权法的基本思想是利用不同对象的同一属性的数值差异信息构造一种信息量, 不同指标的信息贡献率就是各自的权重, 其计算公式如下:

$$\omega_i = \frac{1 - H_i}{n - \sum_{i=1}^n H_i}, \quad (8)$$

其中  $H_i = -\frac{1}{\ln(m)} \sum_{t=1}^m f_{it} / \ln f_{it}$ ,  $f_{it} = v_{it} / \sum_{t=1}^m v_{it}$ ,  $v_{it}$  为第  $t$  ( $t = 1, 2, 3 \dots m$ ) 个对象的  $i$  ( $i = 1,$

2,3,...,n)个指标的数值.

定量与定性相结合的 AHP 模型包含了专家的专业判断和经验,而熵权法对指标的具体数值依赖很大,数据本身的误差无法剔除,结果可能会过度偏离事实.文章通过两种方法的结果取加权平均,使结果更客观,公式如下

$$\omega = \alpha \omega_i + (1 - \alpha) \omega_i', \tag{9}$$

式中  $\omega_i$  是 AHP 模型权重的比例,  $\alpha$  是权重比例系数,此处选 0.5;  $\omega_i'$  为熵权法权重.

### 3 综合风险评估

#### 3.1 综合风险评估体系

依据灾害理论中的致灾因子、承灾体暴露性和脆弱性的指标框架<sup>[17,18]</sup>,借鉴气象灾害、环境污染突发事件的评价分析方法<sup>[19-22]</sup>,结合专家学者提出的雾霾在经济、生态健康、社会和发展等方面表现的潜在风险<sup>[23-26]</sup>,文章选取雾霾危害综合风险评价作为指标体系的目标层,选择致灾因子风险、暴露性风险、脆弱性风险等 3 类对象作为评价指标体系的准则层.考虑到数据的可行性,致灾因子风险包括平方千米烟粉尘年排放量、平方千米二氧化硫年排放量、平方千米氮氧化物年排放量、平方千米民用汽车数量、平方千米年消费总量;暴露性风险包括年旅客周转量、年社会消费品零售总额、年国内外旅游人数、年第二产业产值、农作物播种面积、年城镇登记失业率、年城镇居民人均消费医疗比例、年能源电力消费结构、年第二产业 GDP 比例、年门急诊数量、年住院人数;脆弱性风险包括 PM<sub>10</sub> 年平均浓度、年空气质量不良率、年酸雨频率、年循环类疾病死亡比例、年呼吸类疾病死亡比例.

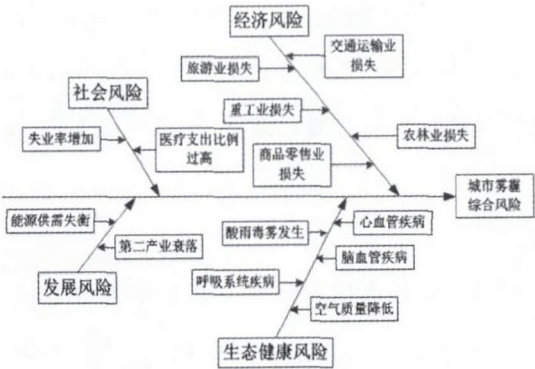


图 1 风险识别的鱼骨图

表 1 综合风险评估指标

准则层		子准则层	指标解释	权值
致灾因子风险		A <sub>1</sub> 平方千米烟粉尘年排放量(万 m <sup>3</sup> /km <sup>2</sup> )	单位土地面积烟粉尘年排放量	0.093
		A <sub>2</sub> 平方千米氮氧化物年排放量(t/km <sup>2</sup> )	单位土地面积氮氧化物年排放量	0.042
		A <sub>3</sub> 平方千米二氧化硫年排放量(t/km <sup>2</sup> )	单位土地面积二氧化硫年排放量	0.044
		A <sub>4</sub> 平方千米民用汽车数量(辆/km <sup>2</sup> )	单位土地面积民用汽车数量	0.092
		A <sub>5</sub> 平方千米能源年消费量(标准煤 t/km <sup>2</sup> )	单位土地面积能源年消费量	0.040
雾		A <sub>6</sub> 年旅客周转量(亿人·km)	年乘坐各类交通工具的人员流通数量	0.036
		A <sub>7</sub> 年社会消费品零售额(亿元)	年各类零售商品的销售收入总和	0.035
霾		A <sub>8</sub> 年国内外旅游人数(万人次)	年国内外来旅游的人员数量总和	0.028
污		A <sub>9</sub> 年第二产业产值(亿元)	年第二产业所有产品的价值总和	0.034
染	暴露性风险	A <sub>10</sub> 年农作物播种面积(千公顷)	年各类农作物的种植面积总和	0.020
		A <sub>11</sub> 年城镇登记失业率(%)	年城镇居民中登记失业的人数比例	0.030
综		A <sub>12</sub> 年城镇医疗支出比例(%)	年城镇居民人均支出中医疗保健的比例	0.030
合		A <sub>13</sub> 年能源消耗结构(标准煤 t/kw·h)	年能源消耗量与电力消耗量的比值	0.030
风 险		A <sub>14</sub> 年第二产业占 GDP 比例(%)	年第二产业产值占国内生产总值的比例	0.030
		A <sub>15</sub> 年门急诊数量(万人次)	年医疗机构接待的急门诊人员数量总和	0.035
		A <sub>16</sub> 年住院人数(万人)	年医疗机构接待的住院人员数量的总和	0.034
		A <sub>17</sub> PM <sub>10</sub> 年平均浓度(ug/m <sup>3</sup> )	全年直径小于 10 微米颗粒物平均浓度	0.061
		A <sub>18</sub> 年空气质量不良率(%)	全年空气质量低于二级标准的天数比例	0.078
	脆弱性风险	A <sub>19</sub> 年酸雨频率(%)	全年所有降雨中酸雨出现的比例	0.078
		A <sub>20</sub> 年循环类疾病死亡率(%)	因循环类疾病死亡人数占所有死亡比例	0.065
		A <sub>21</sub> 年呼吸类疾病死亡率(%)	因呼吸类疾病死亡人数占所有死亡比例	0.064

指标体系中,平方千米烟粉尘年排放量、平方千米二氧化硫年排放量、平方千米氮氧化物年排放量、平方千米民用汽车数量、平方千米能源年消费总量、PM<sub>10</sub> 年平均浓度、年空气质量不良率来自《2012 年中国统计年鉴》,其中 PM<sub>10</sub> 排放量、空气质量不良率采用省会城市数据,空气质量不良率可由空气质量优良率转化;江苏省的循环类疾病死亡比例、呼吸类疾病死亡比例来自江苏省卫计委网站,其中循环类疾病包含心血管疾病和脑血管疾病,江苏、浙江两省的 2012 年酸雨出现频率来自两省的环境监测总站网站;其它数据都来自江苏、浙江和上海三个省市 2013 年统计年鉴.

3.2 经典域和节域

根据综合风险的预警需要,将雾霾综合风险分为 4 个等级,状态为微度、轻度、中度、严重,用 I 级、II 级、III 级、IV 级表示.依据全国平均水平、各省数据和环保部最新的《环境空气质量标准(GB 3098—2012)》确定了经典域集合和节域集合,限于篇幅未列出.

4 结果分析

4.1 评估指标关联系数

由 (3)、(4)、(5)和(6)依次计算综合风险评估关联系数,结果见表 2.关联系数大小与评估等级的符合程度成正比.以上海市为例,烟粉尘排放量的四个风险等级的关联系数分别为-1.350、-1.6689、-0.1824、0.1642,由此可以判断烟粉尘排放量风险属于Ⅳ级,与此类似,可得到其它指标的关联系数等级.常见的评价方法在计算过程中不同指标关联系数所符合的评价等级不同,而且之间表现出互斥性,物元可拓模型能很好地解决这些问题.不同的评估对象里中,不同的评估指标的关联系数等级表现出一定差异,这有助于各个地区定位综合风险的关键风险控制点,并且提供有价值的可行方案,例如上海的评价指标关联系数分析中, $A_1$  平方千米烟粉尘年排放量, $A_2$  平方千米氮氧化物年排放量, $A_4$  平方千米民用汽车数量, $A_5$  平方千米能源年消费量, $A_1$  年酸雨频率的风险级别为严重,因此,预防雾霾风险时优先考虑减少每年烟粉尘排放量、氮氧化物排放量,控制民用汽车增长数量、提高能源使用效益,控制酸雨频次等途径上.

表 2 综合风险指标关联系数

关联系数	江苏				上海	江苏	浙江
	I 级	Ⅱ 级	Ⅲ 级	Ⅳ 级			
$F(V_{1t})_j$	-0.005	0.011	-0.028	-0.045	Ⅳ 级	Ⅱ 级	I 级
$F(V_{2t})_j$	0.009	-0.009	-0.022	-0.029	Ⅳ 级	I 级	I 级
$F(V_{3t})_j$	0.002	-0.001	-0.022	-0.029	Ⅲ 级	I 级	I 级
$F(V_{4t})_j$	0.007	-0.007	-0.050	-0.064	Ⅳ 级	I 级	I 级
$F(V_{5t})_j$	0.018	-0.018	-0.028	-0.032	Ⅳ 级	I 级	I 级
$F(V_{6t})_j$	-0.020	-0.016	-0.009	0.001	Ⅲ 级	Ⅳ 级	Ⅲ 级
$F(V_{7t})_j$	-0.022	-0.017	-0.006	0.010	Ⅱ 级	Ⅳ 级	Ⅲ 级
$F(V_{8t})_j$	-0.025	-0.024	-0.020	0.006	I 级	Ⅳ 级	Ⅳ 级
$F(V_{9t})_j$	-0.029	-0.028	-0.023	0.004	Ⅱ 级	Ⅳ 级	Ⅲ 级
$F(V_{10t})_j$	-0.007	-0.003	0.008	-0.004	I 级	Ⅲ 级	I 级
$F(V_{11t})_j$	-0.007	0.009	-0.003	-0.010	Ⅲ 级	Ⅱ 级	Ⅱ 级
$F(V_{12t})_j$	0.009	-0.004	-0.012	-0.016	I 级	I 级	Ⅱ 级
$F(V_{13t})_j$	0.007	-0.007	-0.018	-0.022	Ⅱ 级	I 级	I 级
$F(V_{14t})_j$	-0.014	-0.010	-0.002	0.005	Ⅱ 级	Ⅳ 级	Ⅳ 级
$F(V_{15t})_j$	-0.017	-0.011	0.005	-0.003	Ⅱ 级	Ⅲ 级	Ⅱ 级
$F(V_{16t})_j$	-0.017	-0.009	0.013	-0.006	I 级	Ⅲ 级	Ⅱ 级
$F(V_{17t})_j$	-0.029	-0.019	-0.002	0.006	Ⅱ 级	Ⅳ 级	Ⅲ 级
$F(V_{18t})_j$	-0.021	0.009	-0.003	-0.025	I 级	Ⅱ 级	I 级
$F(V_{19t})_j$	-0.025	0.011	-0.005	-0.030	Ⅳ 级	Ⅱ 级	Ⅳ 级
$F(V_{20t})_j$	-0.021	0.004	-0.002	-0.022	Ⅱ 级	Ⅱ 级	Ⅱ 级
$F(V_{21t})_j$	0.011	-0.011	-0.036	-0.045	I 级	I 级	Ⅱ 级

4.2 综合风险等级评估

根据 (7) 计算的长三角各省的雾霾危害致灾因子风险、暴露性风险和脆弱性风险, 如表 3 所示, 以上海为例, 致灾因子风险的综合指标关联系数为:  $-0.306, -0.325, -0.167, 0.034$ , 说明上海市致灾因子风险符合第 IV 级风险的标准, 说明上海市的致灾因子风险严重, 亟需改善; 暴露性和脆弱性风险的最大关联系数风别为  $-0.016, -0.049$ , 说明暴露性风险有向 II 级转化的潜力, 脆弱性风险有向 I 级转化的潜力, 暴露性风险转化可能高于脆弱性风险转化可能. 长三角区域的三个省中, 致灾因子风险灾 II 级以下的占  $2/3$ , 暴露性风险在 II 级以下的占  $2/3$ , 脆弱性风险全部在 II 级以下, 说明长三角地区雾霾综合风险主要体现在致灾因子、暴露性两方面的风险.

表 3 各类风险评估结果

类别	上海				等级		
	I 级	II 级	III 级	IV 级	上海	江苏	浙江
致灾因子风险	-0.306	-0.325	-0.167	0.034	IV 级	I 级	I 级
暴露性风险	-0.025	-0.016	-0.126	-0.187	II 级	IV 级	II 级
脆弱性风险	-0.049	-0.057	-0.127	-0.105	I 级	II 级	II 级

各省市综合风险关联系数计算结果和相应评估等级见表 4, 上海综合风险关联系数最大为  $-0.258$ , 处于 III 级和 IV 级之间, 向 IV 级转化的潜力很大, 等级判定为 IV 级. 江苏综合风险关联系数最大为  $-0.151$ , 等级处于 I 级和 II 级之间, 向 II 级转化的潜力很大, 等级判定为 II 级. 浙江综合风险值最大为  $-0.053$ , 向 I 级转化的潜力很大, 等级判定为 I 级. 江苏和浙江的综合风险等级均在 II 级以下, 而上海市的综合风险等级为 IV 级, 说明长三角地区的综合风险地区差别很大, 差别主要来自不同类型风险因子的权重、风险大小以及关联系数差距(改变难易程度).

表 4 长三角雾霾危害综合风险评估结果

综合关联系数	I 级	II 级	III 级	IV 级	风险等级
上海	-0.380	-0.397	-0.421	-0.258	IV 级
江苏	-0.196	-0.151	-0.266	-0.350	II 级
浙江	-0.053	-0.166	-0.340	-0.447	I 级

从表 1 中的风险因因素权重可看出, 平方千米烟粉尘年排放量( $A_1$ )、平方千米民用汽车数量( $A_4$ )、 $PM_{10}$ 年平均浓度( $A_{17}$ )、年空气质量不良率( $A_{18}$ )、年酸雨频率( $A_{19}$ )、年循环类疾病死亡率( $A_{20}$ )和年呼吸类疾病死亡率( $A_{21}$ )等是雾霾危害综合风险的首要影响因素. 结合表 2 中的关联系数评估等级和关联系数差距, 上海致灾因子风险中的平方千米烟粉尘年排放量( $A_1$ )、平方千米民用汽车数量( $A_4$ )是权重大风险大而且改变难度大的风险因素; 脆弱性风险



中的年酸雨频率( $A_{19}$ )权重大风险大但改变难度小,改善效果明显;而平方千米二氧化硫年排放量( $A_3$ )、平方千米能源年消费量( $A_5$ )属于权重较低但风险较大且改变难度较大的风险因素;平方千米氮氧化物年排放量( $A_2$ )、年旅客周转量( $A_6$ )、年城镇登记失业率( $A_{11}$ )属于权重较低风险大但改变难度小的风险因素。

江苏省暴露性风险中的年社会消费品零售额( $A_7$ )、年国内外旅游人数( $A_8$ )、年第二产业产值( $A_9$ )、年门急诊数量( $A_{15}$ )、年住院人数( $A_{16}$ )属于权重低风险大且改变难度大的因素,风险改善效果小;年旅客周转量( $A_6$ )、年农作物播种面积( $A_{10}$ )、年第二产业占 GDP 比例( $A_{14}$ )都表现出权重小风险大且改变难度小,风险改善效果一般;脆弱性风险中的  $PM_{10}$  年平均浓度( $A_{17}$ ),其权重较大风险大且改变难度小,改善效果明显。浙江省暴露性风险中的年旅客周转量( $A_6$ )、年社会消费品零售额( $A_7$ )、年国内外旅游人数( $A_8$ )、年第二产业产值( $A_9$ )、年第二产业占 GDP 比例( $A_{14}$ )属于权重小风险大且改变难度小,改善效果一般;脆弱性风险中的  $PM_{10}$  年平均浓度( $A_{17}$ )、年酸雨频率( $A_{19}$ )属于权重大风险大且改变难度大的因素,改善明显。

4.3 评估模型检验

为了验证物元可拓模型评估结果的客观性,使用综合指数法<sup>[22]</sup>评估了长三角地区的综合风险,三省市综合风险指数如图 1 所示。上海、江苏、浙江综合风险指数分别为:0.079、0.117、-0.196。综合指数法对各省市的风险判断与物元可拓模型类似,但两者区别在于上海综合风险等级高于江苏,而江苏的综合风险指数高于上海,浙江的风险情况相同,其原因主要是物元可拓模型的结果来源于经典域、节域和样本数据的综合拟合信息,而综合指数的计算全部依赖样本数据本身的信息。

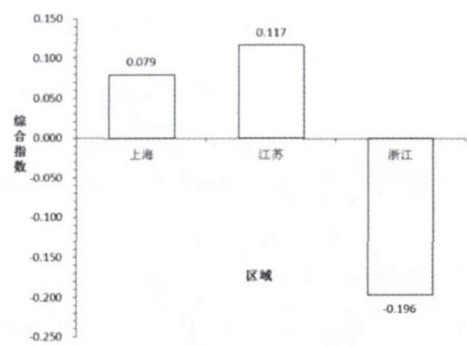


图 2 综合指数评估结果

5 结论

在调查分析各类研究成果基础上,运用风险鱼骨图识别了雾霾灾害在城市经济、社会、生

态和发展方面表现的风险影响因素,并根据雾霾的影响路径确定了雾霾灾害危害的经济产业,人体健康特征,社会和谐风险,城市发展风险等.具体包含了农林业、旅游业、交通运输业、商品零售业和重工业等经济因素,酸雨毒雾、心脑血管、呼吸系统等健康因素,失业增加和医疗支出过高等社会因素,能源供需失衡和产业结构失调等发展因素.

依据灾害系统理论中的致灾因子、暴露性和脆弱性的理论框架,综合雾霾危害的风险因素,构建了雾霾灾害影响因素综合风险评价指标体系,包括致灾因子风险等 3 个准则层指标和平方千米烟粉尘年排放量等 21 个准则层指标.同时根据 AHP 方法和信息熵权法确定了各项风险因素的指标权重.

运用物元可拓模型定量评估江浙沪 3 省市的雾霾灾害风险因素.上海市综合风险主要归因于本地各种化石能源污染物排放过多,近期内需要对年酸雨次数、烟粉尘排放量、民用汽车数量进行干预控制,以期降低综合风险等级;江苏省需要重点降低  $PM_{10}$  年平均浓度来降低综合风险,同时考虑减少年旅客周转量,调整农作物播种区域分布、降低重污染化工行业产值比重;浙江省需要采取措施防范  $PM_{10}$  年平均浓度、年酸雨次数的进一步增加.

### 参考文献

- [1] 施晓晖,徐祥德.北京及周边气溶胶区域影响与大雾相关特征的研究进展[J].地球物理学报,2012,55(10):3230—3239.
- [2] 王杨君,董亚萍,冯加良,等.上海市  $PM_{2.5}$  中含碳物质的特征和影响因素分析[J].环境科学,2010,31(8):1755—1761.
- [3] 包贞,冯银厂,焦荔,等.杭州市大气  $PM_{2.5}$  和  $PM_{10}$  污染特征及来源解析[J].中国环境监测,2010,26(2):44—48.
- [4] 吴兑,吴晟,陈欢欢,等.珠三角 2009 年 11 月严重灰霾天气过程分析[J].中山大学学报(自然科学版),2011,50(5):120—127.
- [5] 程念亮,李云婷,孟凡,等.我国  $PM_{2.5}$  污染现状及来源解析研究[J].安徽农业科学,2014,42(15):4721—4724.
- [6] 董玉芬,王莹莹.中国城市人口与雾霾:相互作用机制路径分析[J].北京社会科学,2014,50(5):4—10.
- [7] Anna R P, Michelle L B. Assessment of Indoor Air Pollution in Homes with Infants[J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2011, 8(12): 4502—4520.
- [8] Jun Wu, Wilhelm M, Chung J, et al. Comparing exposure assessment methods for traffic-related air pollution in an adverse pregnancy outcome study[J]. Environmental Research, 2011, 111(5): 685—692.
- [9] Billionnet C, Emilie G, Kirchner S, et al. Quantitative assessment of indoor air pollution and respiratory health in a population-based sample of French dwelling[J]. Environmental Research, 2011, 111(3): 425—434.

- [10] Martin W J, Glass R I, Arajh H, et al. Household air pollution in low- and middle-income countries: health risks and research priorities[J]. Public Library of Science Medicine, 2013, 10(6): 1-8.
- [11] Kaizhang S B. Air pollution and health risks due to vehicle traffic[J]. Science of the Total Environment, 2013, 450(2013): 307-316.
- [12] Tao Liu, Yong Hui-zhang, Yan Jun-xu, et al. The effects of dust-haze on mortality are modified by seasons and individual characteristics in Guangzhou, China[J]. Environmental Pollution, 2014, 187: 116-123.
- [13] Ghosh J C, Wilhelm, Su J, et al. Assessing the Influence of Traffic-related Air Pollution on Risk of Term Low Birth[J]. American Journal of Epidemiology, 2012, 175(12): 1262-1274.
- [14] Sun Zhen-quan, Shao Long-yi, Mu Yu-jing, et al. Oxidative capacities of size-segregated haze particles in a residential area of Beijing[J]. Journal of Environmental Science, 2014, 26(1): 167-174.
- [15] Shuai Jia-bing, Zhao Zhang, Liu Xiao-fei, et al. Increasing concentrations of aerosols offset the benefits of climate warming on rice yields during 1980-2008 in Jiangsu Province, China[J]. Regional Environmental Change, 2013, 13: 287-297.
- [16] 景国勋,施式亮.系统安全评价与预测[M].江苏徐州:中国矿业大学出版社,2009:245-251.
- [17] 颜峻,左哲.自然灾害风险评估指标体系及方法研究[J].中国安全科学学报,2010,20(11):61-65.
- [18] 肖群鹰,朱正威.公共危机管理与社会风险评价[M].北京:社会科学文献出版社,2013:81-83.
- [19] 周亚飞,程霄楠,蔡靖,等.台风灾害综合风险评价研究[J].中国公共安全(学术版),2013(1):31-37.
- [20] 薛鹏丽,曾维华.上海市环境污染事故风险受体脆弱性评价研究[J].环境科学学报,2011,31(11):2556-2561.
- [21] 廖伟,杨芬,吴宜进,等.基于物元可拓模型的水土保持综合效益评价[J].长江流域资源与环境,2014,23(10):1464-1471.
- [22] 余健,房莉,仓定帮,等.熵权模糊物元模型在土地生态安全评价中的应用[J].农业工程学报,2012,28(05):260-266.
- [23] 李东海.浅谈雾霾天气的识别及预警策略[J].安徽农学通报,2011,17(18):165-167.
- [24] Sun Dan-ping, Huang Guo-qin. Cause, Hazard and Control Measures of Hazy[J]. Advances in Environmental Protection, 2014, 4(4): 101-111.
- [25] 蒋大和.关于灰霾的研究和控制[C].中国环境科学学会学术年会论文集(2010).上海,2010:3252-3256.
- [26] 穆泉,张世秋.2013年1月中国大面积雾霾事件直接社会经济损失评估[J].中国环境科学,2013,33(11): 2087-2094.