

地质环境质量评价的二级模糊指数法

——以山东省环渤海地区为例

徐建国¹ 马震² 张涛¹ 朱恒华¹

(1. 山东省地质调查院, 济南 250013; 2. 天津地质矿产研究所, 天津 300170)

摘要: 地质环境质量评价是环境地质研究领域的难点之一, 本文在充分吸取了前人评价经验的基础上, 根据地质环境质量影响因素较多、评价因子具有层次性、评价结果定量化难度大等特点, 提出了二级模糊指数评价方法。采用该方法所求取的评价结果具有连续性, 定量化程度和可信度较高, 更有利于进行地质环境质量的分析和计算机成图, 便于在环境地质评价领域广泛应用。文中并以山东省环渤海地区为例, 将全区划分为 3 个环境地质区、36 个亚区、679 个网格单元, 计算了各网格单元的模糊质量指数值, 最后绘制了模糊质量指数等值线, 在此基础上对全区地质环境质量进行了评价, 并对该评价方法的合理性进行了评述。

关键词: 地质环境 质量评价 模糊质量指数 隶属度

1 引言

地质环境质量评价是衡量地质环境条件对区域性综合开发或某种开发建设的适宜性程度, 对国民经济建设和区域环境规划有重要意义, 该项工作一直是环境地质研究领域的难点之一。由于地质环境质量评价要考虑多因素、多层次的相互作用, 具有影响因子多、各因子的作用和地位不相同、同一因子在不同的地质环境条件下所起的作用也不尽相同的特点, 因此需要采用综合评价方法。综合评价的基本思想是将地质环境系统分解成几个子系统, 然后对各个子系统分别选取评价因子, 将各评价单元评价因子的相应指标值按权重进行叠加, 得出各评价单元综合评价指标即地质环境质量指数。

由于地质环境质量分级界线具有一定的模糊性, 采用模糊数学方法评价较合理, 其中模糊综合评判法较为有效, 已广泛应用于环境评价领域。本文所提出的模糊质量指数就是通过模糊运算求出的一种综合质量指数, 它克服了以往模糊综合评价结果的不连续性而带来的评价结果非此即彼的缺陷, 具有定量化程度和可信度较高, 且具有连续性的特点。

2 二级模糊指数法的原理与方法

2.1 基本原理

影响地质环境质量的因子具有层次性特征。一般说, 地质环境背景条件、区域环境地质问题和人类工程活动是第一层次的因子, 它们又包含有几个第二层次的因子, 如地质环境背景条件包含地形坡度、区域地壳稳定性、植被覆盖率、地下水资源量等, 而第二层次因子中又可能包含几个第三层次甚至更低层次因子。为避免参评因子过多, 致使各因子的权重分配过小, 主要因子作用不突出, 进而造成评价结果失真, 一般进行两个层次评价(二级评价)即可。

二级评价是对两个层次进行综合评价, 即先对第二层次因子进行综合评价, 在此基础上再对第一层次因子进行评价, 它克服了以往一级模糊质量评价中评价因子单一, 主次不分的缺点, 使

评价结果更合理。

2.2 方法步骤

2.2.1 评价单元的划分

由于地质环境系统存在层次性，且不同系统、子系统的环境质量影响因子不同，所以应首先对评价单元进行层次性划分，一般划分为环境地质区、环境地质亚区和评价网格单元 3 个级别。

环境地质区一般以地形地貌、区域地质环境特征作为主要划分依据，亚区则以环境地质问题发育规律为主要依据划分。以环渤海山东地区为例，划分为胶东低山丘陵环境地质区（Ⅰ）、鲁中南山前冲洪积平原环境地质区（Ⅱ）和鲁北冲积海积平原环境地质区（Ⅲ）3 个区，以环境地质问题与地质灾害分布为主要依据划分为 36 个亚区，其中崩滑流、地面塌陷、地裂缝为主环境地质亚区 6 个，区域地下水位降落漏斗、土地盐渍化为主环境地质亚区 1 个，海（咸）水入侵、地下水污染、区域地下水位下降漏斗为主环境地质亚区 25 个，土地盐渍化为主环境地质亚区 1 个，地质灾害微弱或不发育亚区 3 个，分区情况见图 1。

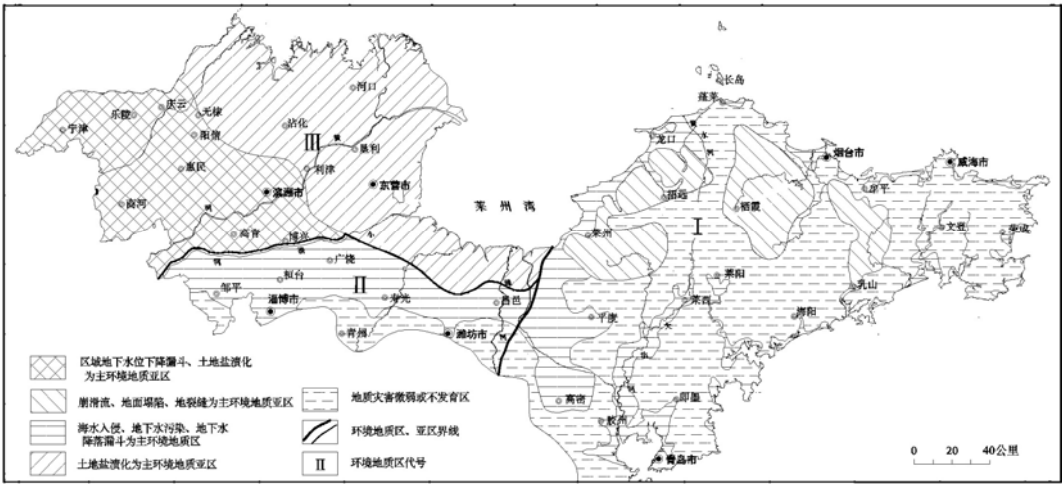


图 1 山东省环渤海地区环境地质分区图

评价网格单元一般按公里网划分，环渤海山东地区单元规格取 10 km×10 km。由于不同的环境地质区、亚区要分开评价，所以剖分网格有完整网格和非完整网格两类，非完整网格是指为环境地质区、亚区分界线所切割，面积小于 10 km×10 km 的网格单元。全区共划分为 679 个网格单元，其中完整网格 552 个，非完整网格 127 个。

2.2.2 评价因子的选取

正确选择评价因子是真实地揭示地质环境质量优劣的前提和基础，评价因子体系是由若干个单项评价因子组成的层次分明的有机整体。环渤海山东地区一级评价因子选取地质环境背景条件、环境地质问题与地质灾害、人类工程活动 3 个，由于影响地质环境质量的因素较多，为突出主要因子的作用，避免参评因子过多造成评价结果失真，每个一级评价因子下以选取 3~4 个二级评价因子为宜。环渤海山东地区环境地质问题种类较多，且不同的环境地质区、亚区影响地质

环境质量的主要环境地质问题类型不同,所以不同的环境地质亚区应选取对该区地质环境质量影响较大的前3个主要环境地质问题作为二级评价因子,共选取10个二级评价因子(表1)。

2.2.3 评价指标的量化分级

评价因子按其地质环境质量正负效应的不同可分为正效应因子(正因子)和负效应因子(负因子)。所谓正效应因子指地质环境质量随因子指标值的增大而变好,如地下水天然资源量、植被覆盖率等;负效应因子指地质环境质量随因子指标值的增大而变差,如海水入侵面积、人口密度等。正、负因子指标的量化方法不同,负因子直接采用其特征值,正因子采用特征值倒数或其它变数(表2)。

表1 评价因子体系组成与参评因子选取表

一级因子	二级因子	环境地质区			备 注
		I	II	III	
地质环境 背景条件	地形坡度	★	★	★	1、不同的环境地质亚区内,按环境地质问题对亚区环境质量影响程度的大小取前3个作为参评因子,付予相应的权重,其它因子权重视为0。 2、★表示该指标为必选,☆表示该指标为可选。
	地下水天然资源量	★	★	★	
	区域地壳稳定性	★	★	★	
	植被覆盖率	★	★	★	
环境地质 问题与地 质灾害	崩滑流、地面塌陷、地裂缝	☆	☆	☆	
	海岸侵蚀	☆		☆	
	浅层地下水质量	☆	☆	☆	
	海水入侵	☆	☆		
	土壤盐碱化	☆		☆	
	深层地下水降落漏斗		☆	☆	
人类工程 活动	人口密度	★	★	★	
	单位面积国民生产总值	★	★	★	
	重大工程建设	★	★	★	

相应于各评价因子的指标量化分级一般采用五值逻辑分类法,通过对地质环境质量影响因子数据的统计分析,确定因子最优和最差2个极限值,划定指标的级差范围,在两个极限值之间,按一定的级差,以阈值递减或递增规律取值来实现量化分级。在评价单元因子指标量化时应以统一大小的网格作为基本评价单元,其它规格剖分单元和非完整剖分单元在指标量化时,部分指标要根据面积比进行相应的换算。如对于海水入侵评价因子,其评价指标应换算成标准单元海水入侵面积,非完整剖分单元指标量化采取以下公式:

$$X = S_{\text{海侵}} \cdot S/S_{\text{非}}$$

式中 X ——海水入侵因子评价指标

$S_{\text{海侵}}$ ——非完整网格海水入侵面积

S ——完整网格面积

$S_{\text{非}}$ ——非完整网格面积

表 2 参评指标选取与指标量化分级值表

二级因子	因子类型	指标量化方法	指标单位	指标量化分级值				
				I	II	III	IV	V
地形坡度	负因子	坡度值	无	0.09	0.14	0.27	0.47	0.70
地下水天然资源量	正因子	资源模数倒数	$(10^4 \text{m}^3/\text{a} \cdot \text{km}^2)^{-1}$	0.02	0.03	0.05	0.10	0.20
区域地壳稳定性	负因子	稳定性分级值	无	0.4	0.5	0.6	0.8	0.95
植被覆盖率	正因子	1—植被覆盖率	无	0.10	0.25	0.50	0.75	0.90
崩滑流、地面塌陷、地裂缝	负因子	分布密度	个/100km ²	0	1	3	5	7
海岸侵蚀	负因子	侵蚀速率	m/a	0	0.5	1	1.5	2
地下水质量	负因子	质量分级	无	1	2	3	4	5
海水入侵	负因子	入侵面积	Km ² /100km ²	0	2	5	10	20
土壤盐碱化	负因子	盐碱化程度	无	1	2	3	4	5
区域地下水漏斗	负因子	最大水位埋深	m	30	40	50	70	100
人口密度	负因子	人口密度	无	200	200	500	800	1000
国民经济指标	负因子	国民生产总值	亿元/100km ²	10	30	50	80	100
重大工程建设	负因子	重大工程数量	个/100km ²	0	1	2	3	4

2.2.4 评价因子权值的确定

地质环境质量评价因子的贡献大小不同,对各因子具有权衡轻重作用程度的数值称权值,因此求权值的过程就是对不同因子间“重要性”程度的分析过程。

权值的确定有多种方法,如专家直接经验法、调查统计法、层次分析法等,其中层次分析法是较为理想的分析方法,它通过组织经验丰富的专家,集中群体智慧,对各评价因子的相对重要性进行评估打分,然后通过层次分析运算得出各评价因子权重。山东环渤海地区评价因子权值采用层次分析法确定,各参评因子权重见表 3、表 4。

表 3 一级评价因子权重取值表

评价因子	地质环境背景条件	环境地质问题与地质灾害	人类工程活动
权重	0.17	0.66	0.17

表 4 二级评价因子因子权重取值表

环境地质亚区	评	权 重	备 注
崩滑流、地面塌陷、地裂缝为主环境地质亚区	崩滑流、地面塌陷、地裂缝	0.90	地形坡度、地下水天然资源量、区域地壳稳定性、植被覆盖率
	浅层地下水质量	0.09	
	海岸侵蚀	0.01	
海水入侵、地下水污染、地下水位降落漏斗为主环境地质亚区	海水入侵	0.40	因子权重依次为 0.125、0.50、0.25、0.125。
	浅层地下水质量	0.40	
	海岸侵蚀	0.20	
区域地下水位降落漏斗、土地盐渍化为主环境地质亚区	区域地下水位降漏斗	0.45	人口密度、国民经济指标、重大工程建设因子权重依次为 0.25、0.25、0.50。
	浅层地下水质量	0.35	
	土地盐渍化	0.20	
土壤盐渍化为主环境地质亚区	土地盐渍化	0.49	
	浅层地下水质量	0.50	
	海岸侵蚀	0.01	

2.2.5 模糊数学模型的构建

(1) 给出评价因子集

根据对评价区地质环境质量影响因子的系统分析，给出评价因子集：

$$\underline{U} = \{u_1, u_2, \dots, u_{10}\}$$

式中 u_1, u_2, \dots, u_{10} 代表评价因子。

(2) 给出地质环境质量等级集

$$\underline{V} = \{v_1, v_2, v_3, v_4, v_5\}$$

式中 v_1, v_2, v_3, v_4, v_5 代表不同的地质环境质量等级：优等、良好、中等、较差、差。

(3) 评价因子隶属度的确定

隶属度是反映评价指标隶属于各种地质环境状态的程度，一般由隶属函数确定，它是用来定量描述评价因子对地质环境质量级别隶属程度大小的函数形式。由于影响地质环境质量因素的相

互作用、影响及地质环境本身的复杂性和模糊性特点，目前在环境质量评价研究中，一般对离散型因素按照专家经验给出隶属度；对于连续性变化的定量指标采用线性隶属函数、正态分布函数等。目前较常用的是线性隶属函数法，即针对地质环境质量影响因素特征，构造半梯形分布隶属函数如下：

$$U_1(x) = \begin{cases} 1 & x \leq x_1 \\ \frac{x_2 - x}{x_2 - x_1} & x_1 < x \leq x_2 \\ 0 & x > x_2 \end{cases}$$

$$U_2(x) = \begin{cases} 0 & x \leq x_1, \quad x > x_3 \\ \frac{x - x_1}{x_2 - x_1} & x_1 < x \leq x_2 \\ \frac{x_3 - x}{x_3 - x_2} & x_2 < x \leq x_3 \end{cases}$$

$$U_3(x) = \begin{cases} 0 & x \leq x_2, \quad x \geq x_4 \\ \frac{x - x_2}{x_3 - x_2} & x_2 < x \leq x_3 \\ \frac{x_4 - x}{x_4 - x_3} & x_3 \leq x < x_4 \end{cases}$$

$$U_4(x) = \begin{cases} 0 & x \leq x_3, \quad x \geq x_5 \\ \frac{x - x_3}{x_4 - x_3} & x_3 < x \leq x_4 \\ \frac{x_5 - x}{x_5 - x_4} & x_4 \leq x < x_5 \end{cases}$$

$$U_5(x) = \begin{cases} 0 & x \leq x_4 \\ \frac{x - x_4}{x_5 - x_4} & x_4 < x \leq x_5 \\ 1 & x > x_5 \end{cases}$$

式中 x_1, x_2, x_3, x_4, x_5 为评价因子指标分级界限值， x 为评价单元实际统计值。

(4) 建立因子评价矩阵

利用隶属函数对诸因子进行评价，其结果为评价集 V 的模糊子集，对于第 i 个因子，其评价集为

$$\underline{R}_i = \{R_{i1}, R_{i2}, R_{i3}, R_{i4}, R_{i5}\}$$

式中 i 分别代表评价指标序号。

因 \underline{U} 和 \underline{V} 之间存在模糊关系 \underline{R} ，故单因子评价矩阵为：

$$R = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \dots & r_{15} \\ r_{21} & r_{22} & \dots & r_{25} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ r_{101} & r_{102} & \dots & r_{105} \end{bmatrix} = (r_{ij})_{10 \times 5}$$

(5) 建立评价因子权值 \underline{A}

$$\underline{A} = (a_1, a_2, \dots, a_{10})$$

式中 a_1, a_2, \dots, a_{10} 代表 10 个评价因子的权值，各指标权值应满足下列关系：

$$\sum_{i=1}^m a_i = 1, a_i \geq 0, i = 1, 2, 3, \dots, 10$$

2.2.6 模糊矩阵复合运算

模糊矩阵复合运算的方法很多，常用的有以下 3 种：

- ① “主因素突出型”，即 $M(\wedge, \vee)$ 模型；
- ② “半主因素突出型”即 $M(\cdot, \vee)$ 模型；
- ③ “加权平均型”，即 $M(\cdot, +)$ 模型。

根据不同级别评价因子对地质环境质量影响程度和特点不同，应采用不同的复合运算方法。

二级评价采用 $M(\cdot, \vee)$ 模型，一级评价采用 $M(\cdot, +)$ 模型，最终形成模糊质量指数 (Fuzzy Quality Index)。

二级评价通过建立单因子评价矩阵 \underline{R} 及权值分配矩阵 \underline{A} ，经模糊运算可得评价结果分别为：

$$\underline{B}_1 = \underline{A}_1 \bullet \underline{R}_1 = (b_{11}, b_{12}, b_{13}, b_{14}, b_{15})$$

$$\underline{B}_2 = \underline{A}_2 \bullet \underline{R}_2 = (b_{21}, b_{22}, b_{23}, b_{24}, b_{25})$$

$$\underline{B}_3 = \underline{A}_3 \bullet \underline{R}_3 = (b_{31}, b_{32}, b_{33}, b_{34}, b_{35})$$

以上 3 组评价结果可组合成一级评价矩阵为：

$$\underline{B} = \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} & \dots & b_{15} \\ b_{21} & b_{22} & \dots & b_{25} \\ b_{31} & b_{32} & \dots & b_{35} \end{bmatrix}$$

一级评价因子权重向量为：

$$\underline{A} = (a_1, a_2, a_3)$$

采用“加权平均型”，即 $M(\cdot, +)$ 运算方法，可求得评价结果 \underline{E}

$$\underline{E} = \underline{A} \cdot \underline{B} = (e_1, e_2, e_3, e_4, e_5)$$

最后采用下式求得模糊质量指数(FQI)，该指数全面应用等级模糊向量 \underline{E} 的信息，且在数值上具有连续性：

$$FQI = \left(\sum_{j=1}^5 e_j^k \cdot j \right) / \left(\sum_{j=1}^5 b_j^k \right)$$

式中 j 为等级数， k 为参数， $k=2, 3, 4, \dots$

这样模糊质量指数实际上反映了评价单元地质环境质量的好坏，FQI 值越大，地质环境质量越差。

根据 FQI 值对评价区地质环境质量进行分区，分区标准为：

地质环境质量优等区	$FQI=1$
地质环境质量良好区	$1 < FQI \leq 2$
地质环境质量中等区	$2 < FQI \leq 3$
地质环境质量较差区	$3 < FQI \leq 4$
地质环境质量差区	$4 < FQI \leq 5$

整个评价工作程序见图 2。

3 评价结果

评价中对区内逐个评价单元进行统计计算，确定评价指标值和权重，采用微机编程进行模糊运算，并用 MAPGIS 软件自动生成 FQI 等值线图，然后根据环境地质评价单元实际情况对等值线进行必要的修正，使评价结果更符合研究区实际情况；最后根据 FQI 等值线图对评价区地质环境质量进行分区（见图 3）。

从评价成果图看出，地质环境质量差区、较差区分布于黄河三角洲、莱州湾沿岸，界河河谷，莱州市南部崩滑流分布区，栖霞市南部崩滑流分布区，栖霞市东北部地面塌陷、崩滑流分布区，其中质量差区位于黄河三角洲沿岸和上述各区中心部位。地质环境质量中等区、良好区分布于质

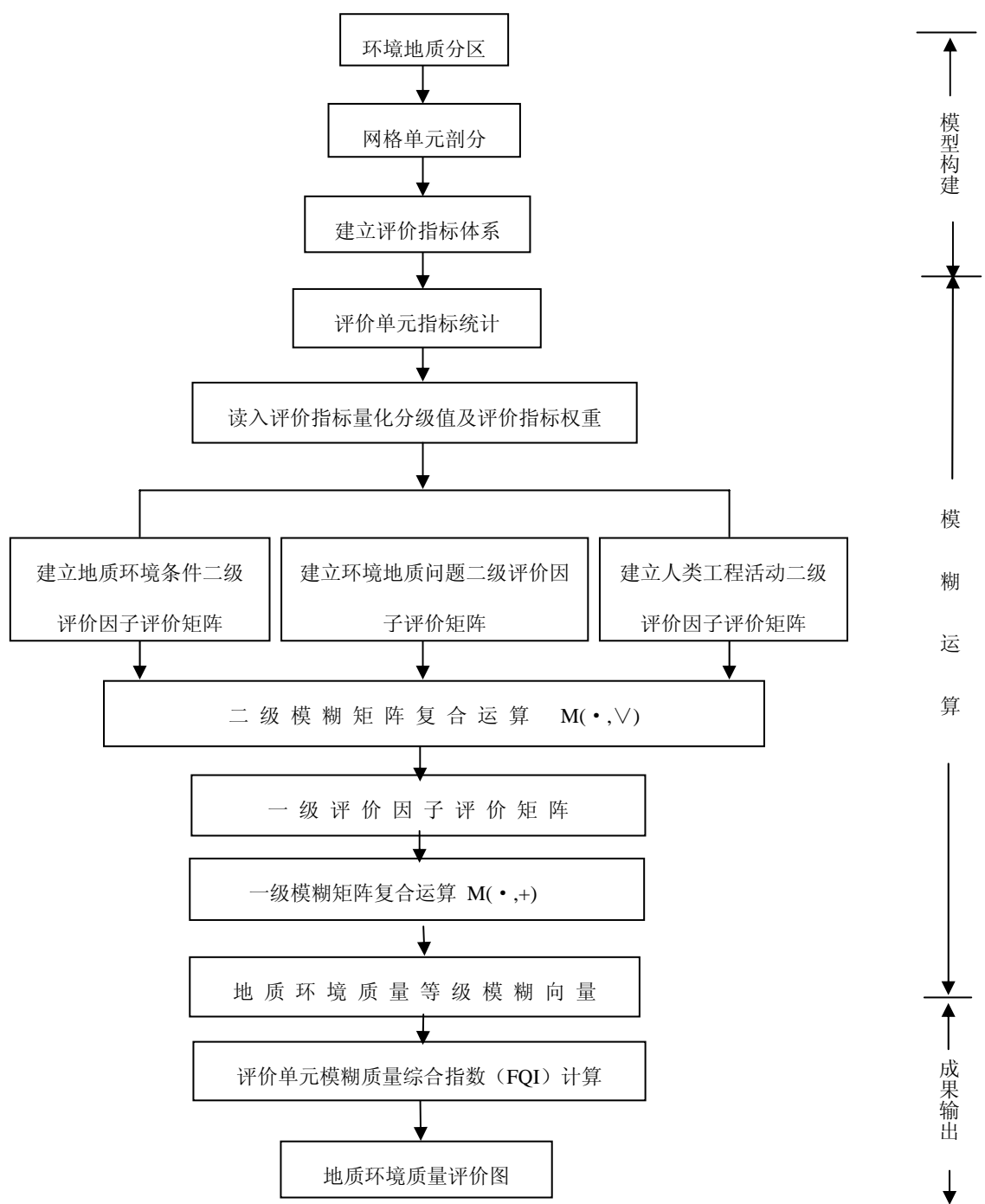


图2 地质环境质量评价工作程序图

量较差区外围、黄泛平原区和部分河谷和河流入海口滨海平原。地质环境质量优等区和良好区分布于胶东半岛低山丘陵区、鲁中南山前冲洪积平原南部和黄泛平原的乐陵—惠民一带、商河县西部。

评价结果与工作区地质环境现状基本一致，质量差区地质环境背景条件较差，地质灾害较发育，地质环境破坏较强烈，如黄河三角洲沿岸地区为无淡水区水环境差，且海岸侵蚀速率为全区之冠，评价结果与现状相符。优等区地质环境背景条件良好，水环境优良，无较大污染源，地质

灾害稀少，评价结果与现状相吻合。评价结果表明，本次地质环境质量评价所采用的评价指标、指标量化方法和评价模型的建立是比较合理的。

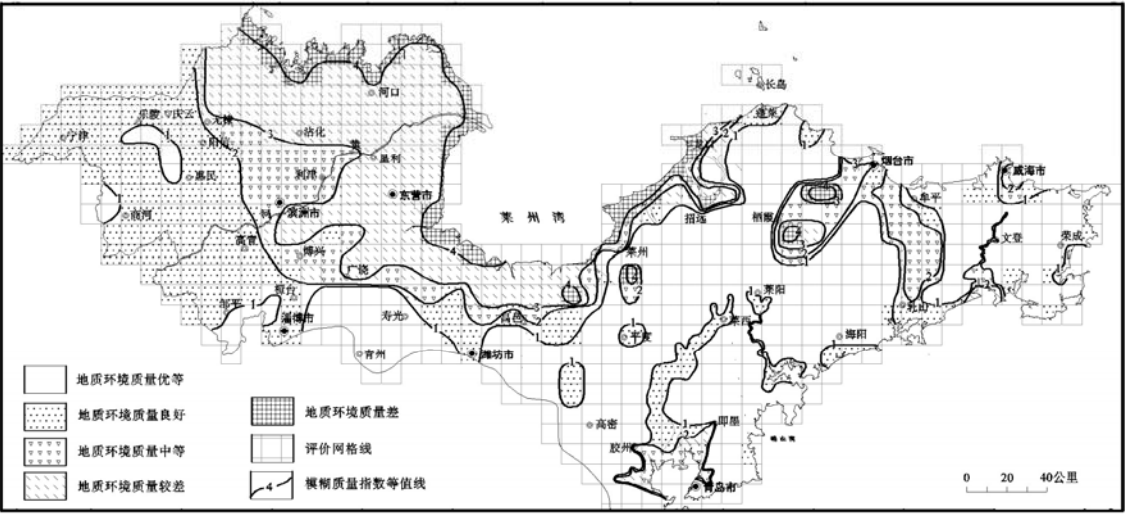


图3 山东环渤海地区地质环境质量评价图

4 结语

(1) 本方法充分考虑了地质环境系统和评价因子的层次性，从两个层次上进行生态地质环境质量综合评价，使评价结果更合理。

(2) 本方法所求取的评价结果具有连续分布的特点，更有利于进行地质环境质量的分析和计算机成图，便于在环境地质评价领域广泛应用。

(3) 结合实例分析，证明采用该方法进行地质环境质量分析，评价结果与研究区实际情况是相符的，本文所提出的评价方法、评价指标确定和量化方法是合理的，这对于其它地区的环境地质评价具有借鉴意义。

参 考 文 献

[1] 冯德益, 楼世博, 林命周. 模糊数学方法与应用, 北京, 地震出版社, 1983.

[2] 吴敦敦, 袁法松. 模糊综合评价在地下水水质综合评价中的应用, 勘察科学技术, 1991, (6): 14-18.

[3] 闫满存, 李华梅, 王光谦. 广东沿海陆地地质环境质量定量评价研究, 工程地质学报, 2000, 08 (04): 416-424.

[4] 毛同夏, 石宏仁, 张丽君. 区域地质环境的定量评价和预测, 地学前缘, 1996, 3 (1-2): 144-146.

[5] 李顺, 王红旗, 陈家军. 环境影响二级模糊综合评价法的研究, 水文地质工程地质, 2002, 2: 38-40.

基金项目：国土资源大调查项目—环渤海地区地下水资源与环境地质调查评价，(200112400005)。

作者简介：徐建国（1965—），学士学位，高级工程师，主要从事水文地质环境地质调查研究工作，联系方式：0531—6556973，E-mail: x.jg_2008@yahoo.com.cn

the Two Distinction Fuzzy Index Method in Geo-environment Quality Assessment ——Taking the Area Around the Bo Sea of Shandong Province for Example

XU Jian-guo¹, MA Zhen², ZHANG Tao¹, ZHU Heng-hua¹

(1.Shandong Geological Survey Jinan 250013;

Institute of Geology and Mineral Resources of Tianjin Tianjin 300170)

Abstract: The geo-environment quality evaluation is one of the most difficult problems in the environmental geology field. The writer of the article gives a method called “Two-distinction Fuzzy Index” to do the evaluation according to the truth that the geo-environment has lots of influential factors and the factors of the evaluation can be divided into many layer levels and it’s difficult to quantify the result of the evaluation by absorbing the experience of the former researches. The result of the evaluation by this method has a character of continuity, high-quantification, high-reliability and it’s easy to show the drawings on computer. So the method can be widely used all across the environmental geology evaluation field. This article takes the area around the Bo Sea for example, divides the area into 3 regions and 36 secondary regions and 379 grid cells and then figures out the fuzzy quality index of each grid cell and finally draws the fuzzy quality index isolines. Finally, the writer evaluates the geo-environment quality of all the area according to the method and comments on the rationality of the method.

Key words : geo-environment, quality assessment, fuzzy quality index, grade of membership