

高懿琼, 骆正山, 毕傲睿, 等. 湿陷性黄土区长输管道耦合协调危险性评价[J]. 灾害学, 2020, 35(4): 20–23, 92. [GAO Yiqiong, LUO Zhengshan, BI Aorui, et al. Risk Assessment of Coupling Coordination of Long-distance Pipelines in Collapsible Loess Region[J]. Journal of Catastrophology, 2020, 35(4): 20–23, 92. doi: 10.3969/j.issn.1000-811X.2020.04.005.]

湿陷性黄土区长输管道耦合协调危险性评价^{*}

高懿琼, 骆正山, 毕傲睿, 张新生

(西安建筑科技大学 管理学院, 陕西 西安 710055)

摘 要: 湿陷性黄土是影响长输油气管道安全运营的主要地质灾害之一, 开展湿陷性黄土区长输管道风险评价有助于预防和减轻其造成的损失。该文以兰成渝长输油气管道甘肃段为例, 基于耦合协调原理, 将风险评价系统分解为土体、管体子系统, 利用熵权法计算指标权重, 结合耦合协调模型, 最终确定了管段的危险度及相应耦合度。实例分析结果表明: ①研究区域的管道风险等级和耦合度均为中等偏高且风险耦合度一致性较高, 该管段黄土的湿陷强度、管道受力、覆土厚度因素等更易诱发湿陷性管道破坏; ②管体系统中的受力、埋深分别占较大权重, 该管段应加强相关因素的监测和维护。该评价方法能合理、准确反映湿陷性黄土区长输管道的风险状况, 具有良好的工程应用价值。

关键词: 管道安全; 地质灾害; 湿陷性黄土; 风险评价; 耦合协同理论

中图分类号: TE832.2; X43; X915.5 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-811X(2020)04-0020-05

doi: 10.3969/j.issn.1000-811X.2020.04.005

我国目前陆上油气管道规模大约 17×10^4 km, 其中由于西气东输相当一部分管道会穿越中西部地区的湿陷性黄土区, 如马惠宁传输管段、兰成渝管段等, 造成这些管段的油气管道面临着一定的黄土湿陷性地质灾害风险, 极易发生水毁、坍塌、冲沟等灾害, 最终导致管道裸露、悬空、变形, 进一步造成失效甚至破坏, 因此有必要对湿陷性黄土区的油气管道进行危险性评价。

目前国内外学者在管道危险性评价方面做了大量研究, 如 Jamshidi 等^[1] 将定性与定量评价结合, 建立了模糊逻辑和相对风险评分的管道综合风险评估模型; Lozoya 等^[2] 对于灾害危险性评估提出了方法框架; Fayaz M 等^[3] 提出了一种基于启发式的隶属函数确定层级模糊推理系统, 并应用于管道的危险性评估。而针对湿陷性黄土区管道的危险性研究中, 国外主要集中在管道力学分析方面^[4], 而国内伴随着黄土湿陷特征的研究, 目前从管道的应力应变分析转向在湿陷性黄土区管道的水毁特征分析, 继而对由地质灾害引起的管道危害性进行评估研究。如陈国辉^[5] 等通过构建贡献率模型, 对管道水毁的影响因素敏感性进行全面分析及排序。焦中良等^[6] 通过在不同工况下建立有限元模型对管道受力进行分析, 为滑坡区域管道的安全运营提供参考依据。钟威等^[7] 通过分析典型地质灾害对油气管道的危害形式, 建立了管道在地质灾害中的风险评价指标体

系及评分标准。俞英娜等^[8] 在大量灾害调研的基础上, 建立了基于模糊数学综合评判的危害评价方法。以上成果从不同角度实现了地质灾害下管道的危险性研究, 而对湿陷性黄土区管道的综合危险评价研究还很少见。

综上, 笔者拟在对湿陷性黄土区管道调研基础上, 结合影响湿陷性黄土区管道危险因素的特点, 建立一套针对湿陷性黄土区管道危险性评价的因素集。管道工程以非线性叠加改变原来的土体系统, 构成了以管道、湿陷性黄土土体为耦合的、相互协调演进的湿陷性黄土区管道危害系统, 应用耦合协同理论, 采用熵权法计算权重, 最终实现湿陷性黄土区油气管道的危险性评价, 以期对湿陷性黄土区油气管道的维修或替换提出参考意见。

1 耦合协同理论

耦合协同理论是目前在城镇化质量评价、道路危险品运输风险评价、煤矿安全应急管理评价、山洪泥石流风险评价^[9-10] 中有所应用并取得了一定效果的系统性方法。在耦合协同理论中, 系统内各要素存在协同性、自组织性及可度量性, 共同促进耦合协调的程度的高低决定了系统在达到

^{*} 收稿日期: 2020-03-23 修回日期: 2020-05-27

基金项目: 国家自然科学基金(41877527); 陕西省社科基金(2018S34)

第一作者简介: 高懿琼(1989-), 女, 甘肃庆阳人, 博士研究生, 主要从事油气管道安全评价、地下储气库安全评价等研究。

E-mail: 610850296@qq.com

通讯作者: 骆正山(1969-), 男, 陕西汉中, 教授, 博士生导师, 主要从事天然气管道及地下储气库领域的教学与科研工作。

E-mail: luozhengshan@163.com

临界区域走向何种序与结构。由于长输油气管道在穿越湿陷性黄土区的运营过程中会受到多种复杂因素的影响, 而目前的评价方法中, 未能全面考虑到湿陷性黄土这种地质问题与管体间的互馈关系。因此, 综合考虑湿陷性黄土的湿陷特性以及管体与土体的复杂条件, 从湿陷性黄土与管道之间的相互促进, 彼此制约, 协同演进的角度出发, 本文应用耦合协同理论实现湿陷性黄土区长输油气管道的危险性评价。

1.1 耦合与协同

耦合是两个及两个以上的子系统间相互作用、相互影响并最终改变其发展趋势。这种趋势的变化对子系统间的影响程度的大小称为耦合度^[11]。

$$C_n = \left\{ \frac{U_1 \times U_1 \times \cdots \times U_n}{\prod (U_i + U_j)} \right\}, \quad (1)$$

式中: C_n 为系统的耦合度, $C_n \in (0, 1)$, 耦合度的值越大代表系统间影响程度越大。 U 为子系统对总系统的贡献度。 U_i 、 U_j 表示各子系统对总系统的影响程度。其中 $i=1, 2, \dots, n$; $j=1, 2, \dots, n$, $i \neq j$; n 表示子系统的个数。

为了能较好地描述子系统间的发展趋势, 引入协同关系对耦合状态进行衡量, 构成耦合协同度模型。

$$D = \sqrt{C_n \times T}, \quad (2)$$

式中: D 为耦合协同度; T 为各子系统间的协同指数, 则有

$$T = \alpha_1 u_1 + \alpha_2 u_2 + \cdots + \alpha_n u_n, \quad (3)$$

其中: $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n$ 为待定系数。

1.2 功效函数

对事件结果的估计与判定准则间建立功效函数, 来反映各子系统的大小及变化对总系统演进的影响程度, 功效函数包括正、负两种功效。

正、负功效函数分别为

$$X_{ij} = \frac{[(x_{ij})_{\max} - (x_{ij})_{\min}]}{[(x_{ij})_{\max} - (x_{ij})_{\min}]}; \quad (4)$$

$$X_{ij} = \frac{[(x_{ij})_{\max} - x_{ij}]}{[(x_{ij})_{\max} - (x_{ij})_{\min}]}。 \quad (5)$$

式中: x_{ij} 为第 i 个系统中第 j 个指标的初值, X_{ij} 为第

i 个系统中第 j 个指标的功效函数值, $x_{ij} \in (0, 1)$ 。

正功效值越大, 表明系统的耦合协同度发展越不利; 负功效值越大, 表明系统的耦合协同度发展越有利。通过对各子系统间的变量 x_{ij} 的影响程度加权求和得到各子系统间总的影响度 U_i 。

$$U_i = \sum_{j=1}^m w_{ij} \cdot X_{ij} \quad (6)$$

式中: w_{ij} 为第 i 个系统中第 j 个指标的权重值, m 为系统中因子的个数。由此, 耦合协同评价模型的建立是以功效函数作为基础。

2 湿陷性黄土区油气管道的耦合协同危险性评价模型

2.1 建构湿陷性黄土区管道危险性评价因素集

黄土具有含水量低、大孔及多孔隙的特征, 当浸水、发物理和化学作用时, 黄土内部结构联结力降低, 胶结物受浸湿后, 结合水膜变厚, 易溶盐溶解, 土体界面上的应力大于其抗剪强度, 使土体间的颗粒骨架分开, 结构强度破坏, 从而产生湿陷。根据《GB50025-2004 湿陷性黄土地区建筑规范》^[12] 规定: 当黄土湿陷系数 $\delta_s \geq 0.015$ 时, 则为湿陷性黄土。

由于湿陷性黄土易变形和黄土陷穴的发育特征, 可能有管道地基失稳、管道裸露、悬空、腐蚀、变形甚至破坏等现象产生。根据黄土湿陷性及管道易损性的特点, 将其区域内的管道划分为土体、管体 2 个方面, 并借鉴前人的研究成果^[10,13], 选取土体、管体作为两个耦合的条件, 以黄土陷穴易发性、土壤湿陷强度、管道腐蚀、管道埋深、管道受力等主要因素来反映湿陷性黄土区长输管道的危险性。引起湿陷性黄土区管道危险事故的因素很多, 在调查分析众多管道风险事故, 分析众多学者的研究成果, 并结合《油气输送管道完整性管理规范》^[14], 在湿陷性黄土区管道危险源辨识的基础上, 建立危险性评价指标体系如图 1 所示。

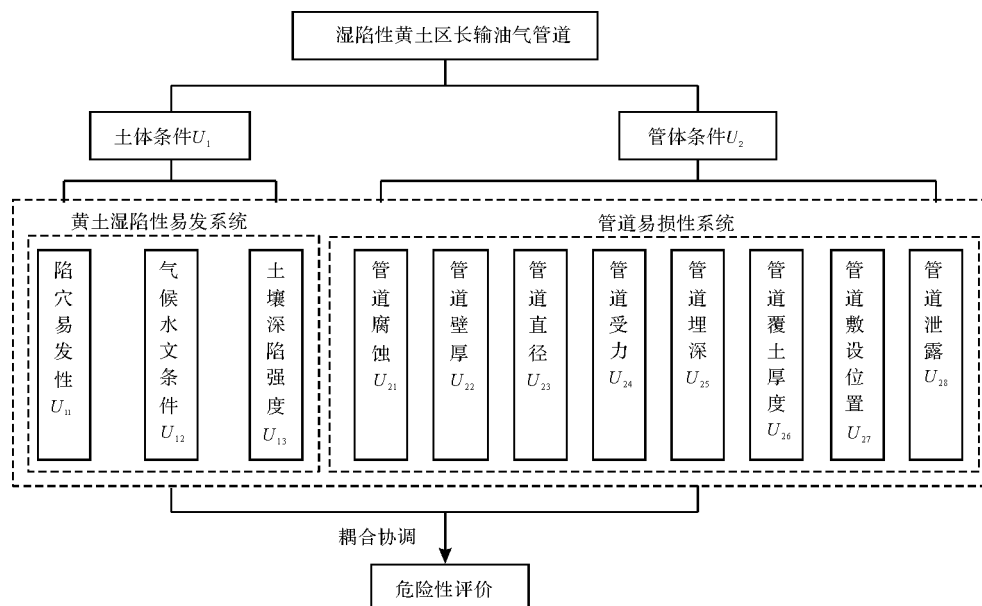


图1 湿陷性黄土区长输油气管道危险性评价体系

2.2 湿陷性黄土区长输油气管道系统耦合协调模型

湿陷性黄土区长输油气管道系统的耦合度,即:

$$C = m \left\{ \frac{(U_1 \cdot U_2 \cdot \dots \cdot U_m)}{\prod (U_i + U_m)} \right\}^{\frac{1}{m}}, i = 1, 2, 3, \dots, m. \quad (7)$$

式中: C 为总的系统耦合度, $C \in (0, 1)$, m 为子系统数目。

该耦合系统含 2 个子系统, 即 $m = 2$, 则其耦合度如下:

$$C = 2 \left\{ \frac{U_1 \cdot U_2}{U_1 + U_2} \right\}^{\frac{1}{2}}. \quad (8)$$

由于耦合度只能说明系统中两个子系统相互作用的强弱, 不能反映系统协调水平的高低, 不分利弊。^[15] 因此, 引入协调度更好地评判两个子系统间相互耦合、协调演进的程度, 表示两个子系统相互作用过程中有利于湿陷性黄土与管道的耦合程度的大小, 构造湿陷性黄土管道危险系统耦合协调度函数。其计算公式如下:

$$D = (C \cdot T)^{\frac{1}{2}}. \quad (9)$$

式中: D 为系统耦合协调度, T 为管体、土体条件综合协调指数, 反映湿陷性黄土与管道系统的整体协同效应, 则有:

$$T = \alpha \cdot U_1 + \beta \cdot U_2. \quad (10)$$

式中: α 、 β 为子系统影响程度待定系数。

2.3 确定指标权重

在管道危险性评价中, 权重对评价结果至关重要。确定的熵值越大则指标权重越大, 信息量越丰富, 在评价中发挥的作用越大; 反之亦然。对原始数据进行标准化, 则有

$$R = (r_{ij})_{mn}. \quad (11)$$

式中: 评价指标 $r_{ij} \in R_{mn}$; 将 R 进行归一化处理, 其中, m 表示指标个数, n 代表评价单元。

则第 i 个评价指标的熵为:

$$e_i = \frac{\sum_{j=1}^n p(x_{ij}) \ln p(x_{ij})}{\ln n}. \quad (12)$$

式中:

$$p(x_{ij}) = \frac{r_{ij}}{\sum_{j=1}^n r_{ij}}. \quad (13)$$

则第 i 个评价指标的熵为:

$$w_i = \frac{1 - e_i}{\sum_{j=1}^n 1 - e_j}. \quad (14)$$

式中: $0 \leq w_i \leq 1$ 且 $\sum_{i=1}^m w_i = 1$ 。

由此, 系统的耦合协调度值在 $[0, 1]$ 之间。敷设在湿陷性黄土区的管道, 会因土体的水力及物理化学侵蚀, 管道的覆盖层变薄、埋深不足而发生局部土体凹陷, 管道裸露、悬空、弯折、断裂甚至失效等事故; 另外, 湿陷性黄土的侵蚀力会影响管道上行线路、阴保桩甚至堵塞站场等。因此, 需要准确判断其危害, 进一步深入剖析引发事故的可能性。根据参考文献中的实际工作经验和相关研究成果^[16], 以耦合协调程度作为基础, 将湿陷性黄土管道危险系统耦合协调类型和危险度都划分为五种类型(表 1)。

3 实例分析

以兰成渝甘肃管段湿陷性黄土区管道为例进行耦合协调危险性评价, 湿陷性黄土区兰成渝甘肃管段管道跨度范围广, 地形复杂多变。笔者通过现有数据和已有文献资料, 结合在湿陷性黄土区甘肃管段管道特点, 获得 11 个风险因素。在耦合协调系统中, 土体指标为 3 个, 管体系统指标为 8 个, 对以上分析的危险因素进行分析, 结合划分得到的 150 个管道单元, 每个管道单元包含 11 个指标信息。其中, 管体和土体指标数据分别见表 2 和表 3 所示。

根据公式(2)和(3)求得每个子系统的影响程度。利用公式(12)和(14)求得子系统的指标权重, 如表 4 所示。

表 1 湿陷性黄土区管道系统耦合协调类型与危险度划分

耦合协调度	耦合协调类型	危险度	湿陷性黄土区管道耦合协调系统描述
0.10 ~ 0.20	低度耦合协调	低	子系统间相互促进, 协调演进程度差, 主要影响因素权重小, 协调配合导致管道失效可能性较小, 可以忽略不计, 维持现状
0.30 ~ 0.40	较低度耦合协调	较低	子系统间相互促进, 协调演进程度较差, 主要影响因素权重较小, 协调配合导致管道失效可能性小, 管道可发生小规模裸露或悬空
0.50 ~ 0.60	中度耦合协调	中等	子系统间的相互促进、协调演进作用及影响因素权重均中等, 但协调配合度尚可, 可使管道发生中等规模湿陷性地质灾害, 发生管沟沉陷, 使管道发生变形破裂
0.70 ~ 0.80	较高度耦合协调	较高	子系统间相互作用较大, 系统演进性较强, 影响因素权重较大, 耦合协调度较高, 能发生大规模管道湿陷性灾害, 迫使管道破坏失效
0.90 ~ 1.00	高度耦合协调	高	子系统间相互作用大, 系统演进性强, 影响因素权重大, 耦合协调度高, 能发生大规模管道湿陷性灾害, 迫使管道失效, 诱发滑坡等次生灾害

表 2 甘肃段部分管道土体指标数据表

管道序号	年平均降水量/mm	湿陷性黄土覆土厚度/m	湿陷系数 δ_s	湿陷起始压力/kPa	湿陷等级
1	825.01	10	0.022 ~ 0.057	> 33	Ⅱ级
2	863.85	12	0.024 ~ 0.086	> 33	Ⅲ级
3	863.85	8	0.017 ~ 0.030	> 30	Ⅰ级
4	863.85	12	0.031 ~ 0.124	> 30	Ⅲ级
...
150	866.78	9	0.029 ~ 0.107	> 30	Ⅱ级

表 3 甘肃段部分管道管体指标数据表

管道序号	埋深/m	壁厚/mm	缺陷密度/(kg/m ³)	埋设位置/m
1	1.52	8.2	0	242.36
2	1.78	7.3	0.00316	421.57
3	2.06	7.3	0.00625	388.62
4	1.93	5.9	0.00210	570.04
...
150	0.92	5.9	0.03271	761.25

表 4 管道评价各因素权重

子系统	评价指标	权重
土体系统	陷穴易发性	0.2821
	气候水文条件	0.2903
	土壤湿陷强度	0.4026
管体系统	管道腐蚀	0.0413
	管道壁厚	0.0687
	管道直径	0.0810
	管道受力	0.3498
	管道埋深	0.2341
	管道覆土厚度	0.0934
	管道敷设位置	0.0890
	管道泄漏	0.0325

研究表明在两个子系统中管体所占权重更高, 其中管道的沉降量、土的抗剪强度权重较高, 表明管道受力和管道埋深对管道能否正常运营产生较大影响。在土体系统中土的含水量、水的渗流度、湿陷系数等权重较高, 则表明气候水文条件、土壤湿陷强度对管道能否正常运营产生明显影响。湿陷性黄土区甘肃管段部分管道评价结果如表 5 所示。

表 5 甘肃段部分管道评价结果

管道序号	U_1	U_2	C	T	D
150	0.2126	0.3105	0.9147	0.2022	0.5725
103	0.1434	0.3327	0.9125	0.2236	0.5518
104	0.2632	0.3196	0.9872	0.2791	0.5532
105	0.2112	0.3237	0.9693	0.2493	0.6935
106	0.3237	0.3071	0.9997	0.3145	0.5657
118	0.8321	0.3125	0.8816	0.6352	0.6103

根据耦合协调度与危险度划分结果, 得出湿陷性黄土区甘肃管段耦合协调度中等偏高, 应重点监测预防, 以免诱发次生地质灾害影响管道正常运营。因此, 高度耦合协调的管道危险度更高, 低耦合协调度的管道危险度更低, 管道的危险度与耦合协调度体现出较好的一致性(图 2)。

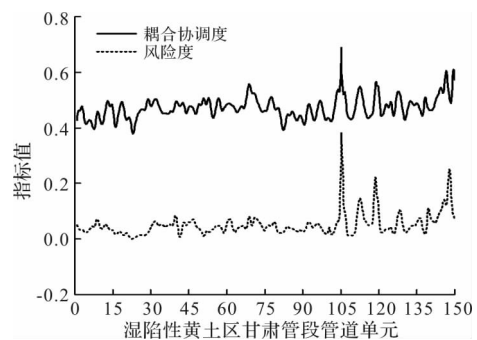


图 2 甘肃管段管道单元耦合协调与危险度对比图

4 结论

(1) 湿陷性黄土容易导致黄土陷穴、泥石流等地质灾害发生。土壤的含水量、水的渗流度、湿陷强度易导致黄土湿陷性产生, 管道的沉降量、土对管道的应力及抗剪强度指标对管道能否正常运营起着重要的影响。因此该管段管道应注重管体悬空、裸露和破坏的危险。另外, 将管体与土体结合, 应用耦合协同理论可以优化危险性评价方法, 对湿陷性黄土区长输管道的危险性评价工作具有积极的借鉴价值。

(2) 由于管体自身缺陷, 采用熵权法能更合理确定指标权重。基于耦合协同理论, 考虑管体和土体中的各种复杂因素、条件间的相互作用, 相互影响, 协调发展的特点, 通过兰成渝长输管道甘肃管段的验证, 研究表明, 该方法可行且符合实际情况, 危险度、耦合度一致性较高。即耦合协调度低, 则管道危险度低, 管道受黄土湿陷性影响诱发次生地质灾害的概率也低, 反之亦然。

(3) 基于耦合协调理论湿陷性黄土区长输油气管道危险性评价, 为湿陷性黄土区长输管道危险性评价工作提供了新思路, 能够系统全面客观的去评估风险。本研究由于数据限制, 如何对评价系统更进一步细化还需进行深入研究。

(下转第 92 页)

gree of the maximum flood process encounter for 7 days and 15 days, and the interval length of annual maximum flood peak by set pair situation ordering method based on improved four-element connection number. The results showed that the flood encounter severity of the Yangtze River and Jialing River were high, the flood encounter severity of the Yangtze River and Wujiang River were ordinary, while the flood encounter severity of Jialing River and Wujiang River were mild. Set pair situation ordering of flood encounter can quantitatively evaluate flood encounter severity from the perspective of the same situation, the equilibrium situation and the inverse situation, clearly and comprehensively demonstrate the magnitude, overlap degree and interval time of flood peak and flood volume on the impact of flood encounter in the main stream and tributaries, quantify the severity of flood encounter into different levels, and provide decision basis for flood disaster reduction and scientific operation of river basin.

Key words: flood encounter; hydrological statistics; four-element connection number; set pair situation; the upper Yangtze River

(上接第 23 页)

参考文献:

- [1] JAMSHIDI A, YAZDANI-CHAMZINI A, Yakhchali S H, et al. Developing a New Fuzzy Inference System for Pipeline Risk Assessment[J]. Journal of Loss Prevention in the process Industries, 2013, 26(1): 197–208.
- [2] LOZOYA J P, SARDA R & JIMENEZ J A. A Methodological Framework for Multi-hazard Risk Assessment in Beaches[J]. Environmental Science & Policy, 2011, 14(6): 685–696.
- [3] FAYAZ M, AHMAD S, HANG L, et al. Water Supply Pipeline Risk Index Assessment Based on Cohesive Hierarchical Fuzzy Inference System. Processes, 2019; 7(4): 182.
- [4] LIU C G, ZHANG S B. The response analysis for buried pipelines in nuclear power plant subjected to the subsidence[C]//China-Japan-U.S. Trilateral Symposium on Lifeline Earthquake Engineering, 2013: 192–199.
- [5] 陈国辉, 吴森, 潘国耀. 基于贡献率模型的管道河(沟)道水毁灾害危险性评价指标体系[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2019, 30(4): 123–128.
- [6] 焦中良, 谷海威, 郭杰等. 滑坡条件下埋地管道的应力分析[J]. 煤气与热力, 2014, 34(12): 11–16.
- [7] 钟威, 高剑锋. 油气管道典型地质灾害危险性评价[J]. 油气储运, 2015, 34(9): 934–938.
- [8] 俞英娜, 袁维红, 杨鹏. 模糊数学在长输管道黄土湿陷性危害评价中的应用研究[J]. 中外建筑, 2019(9): 188–191.
- [9] 衡连伟, 夏业领. 煤矿安全应急管理系统耦合协调度评价研究[J]. 安徽理工大学学报(社会科学版), 2018, 20(1): 55–61.
- [10] 熊俊楠, 孙明远, 孙铭. 基于及耦合协调原理的长输管道山洪泥石流风险性评价[J]. 天然气工业, 2019, 39(3): 116–124.
- [11] 白爱桃, 叶得明. 西北干旱区人口-农业经济-生态耦合协调态势分析——以甘肃省民勤县为例[J]. 资源开发与市场, 2017, 33(1): 54–58.
- [12] 崔靖俞, 张吾渝, 解邦龙, 等. 西宁地区不同深度原状黄土湿陷性及微观机理研究[J]. 岩土工程学报, 2019, 41(S2): 249–252.
- [13] 柴强飞, 肖忠东, 高竞喆, 等. 基于尖锥网络分析法的管道风险评价研究[J]. 中国安全科学学报, 2017, 27(7): 88–93.
- [14] 帅义, 帅健, 苏丹丹. 企业级管道完整性管理体系构建模式[J]. 中国安全科学学报, 2016, 26(7): 147–151.
- [15] 王滨, 王维早, 齐剑锋, 等. 基于耦合协同理论的泥石流危险性评价研究[J]. 地球与环境, 2012, 40(3): 405–411.
- [16] 周欣海. 油气管道黄土湿陷性危害模糊综合评价[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2016.

Risk Assessment of Coupling Coordination of Long-distance Pipelines in Collapsible Loess Region

GAO Yiqiong, LUO Zhengshan, BI Aorui and ZHANG Xinsheng

(School of Management, Xi'an University of Architecture & Technology, Xi'an 710055, China)

Abstract: Collapsible loess is one of the major geological disasters that affect the safe operation of long-distance oil and gas pipelines. we take the Gansu section of Lanzhou-Chengdu-Chongqing long-distance oil and gas pipeline as an example. Based on the coupling coordination principle, the risk assessment system is decomposed into soil and pipe body subsystems. The entropy weight method is used to calculate the index weight. The results of case analysis show that: (1) the risk level and coupling degree of the pipeline in the study area are both medium and high, and the risk coupling degree is consistent. Collapsible pipeline failure is more likely to be induced by factors such as collapsible loess strength, seepage degree of water, pipeline stress, and overburden thickness. (2) stress and buried depth in the pipe system respectively account for a large weight, and monitoring and maintenance of relevant factors should be strengthened in this pipe section. This evaluation method can reasonably and accurately reflect the risk status of pipelines in collapsible loess area and has good engineering application value.

Key words: pipeline safety; geological disaster; collapsible loess; risk assessment; coupling and synergy theory